MAGYAR GEOFIZIKA
51. évf. (2010) 4. szám, 209–226

OTKA

A „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések” c. K49604. sz. OTKA-projekt eredményeiből

Szalai S., Varga M., Novák A., Szarka L.

A Magyar Tudományos Akadémia Geodéziai és Geofizikai Kutató Intézete, H-9400 Sopron, Csatkai u. 6–8.
E-mail: szalai@ggki.hu, varga1m@monornet.hu, novak@ggki.hu, szarka@ggki.hu

A „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések” c. OTKA keretében olyan geoelektromos elrendezések szisztematikus vizsgálatát vállaltuk, amelyeket vagy egyáltalán nem használtak még a gyakorlati kutatások során, vagy amelyeket használtak ugyan néhány alkalommal, de aztán elfeledték őket. Az elrendezések áttekintése érdekében először összegyűjtöttük az összes, valaha használt geoelektromos elrendezést, egységes módon ábrázoltuk és rendszereztük azokat. Megvizsgáltuk, hogy milyen motiváció volt az egyes elrendezések kialakításának hátterében, és hogy az egyes elrendezések létrehozása során alkalmazott stratégiák alkalmazhatók-e a multielektródás mérésekben. Megadtuk a tetszőleges felszíni elektródaelrendezések paraméterérzékenység-térképeinek (PÉT) számításához szükséges képletet, és segítségével elkészítettük az összes olyan elrendezés paraméterérzékenység térképeit (PÉT), amelyeknél ez lehetséges. Példákkal illusztráltuk e térképek használhatóságát. Kiszámítottuk 30 elrendezés Roy és Apparao-, és Edwards-féle kutatási mélység értékét, az egyes elrendezések vertikális felbontóképességét, a kutatási mélységértékek és a felbontóképességi értékek viszonyát egymáshoz, valamint a kutatási mélység és a zajok viszonyát. Megállapítottuk 6 elrendezés egyes modellekre vonatkozó ún. kimutathatósági mélységértékeit különböző zajszintek feltételezésével. Ezek az elméleti vizsgálatok adtak alapot a terepi mérések megfelelő megtervezéséhez és kivitelezéséhez, melyek során elsőként lemértük az elektródák különböző terepi körülmények között várható pozicionálási hibáit, és kiszámítottuk az ebből eredő hibák hatását különböző sokelektródás elrendezések esetére. Később tenzoriális geolektromos régészeti méréseket végeztünk, majd teszteltük a 3D elektromos tomográfia lehetőségeit aknák kimutatására különböző talajviszonyok között és különböző mélységekben. Kidolgoztunk egy eljárást többirányú repedésrendszerek kutatására. Kifejlesztettük az ún. szúrópróba-lejárást, és bizonyítottuk annak használhatóságát régészeti kutatásokban. Ez a cikk csak illusztrálja kutatási eredményeinket, azok részletei a hivatkozott publikációkban lelhetőek fel.

Szalai, S., Varga, M., Novák, A., Szarka, L.: From the results of the OTKA project “Non-conventional geoelectric arrays” K49604

In the frame of the OTKA project “Non-conventional geoelectric arrays” we systematically investigated geoelectric arrays which has never been applied in the field measurements before or which has been applied, but later forgotten. In order to have an overview over all ever used geoelectric arrays we collected, classified and presented them in a unified way. It was investigated as well, which strategies were behind the development of these arrays and whether these strategies could be used in the future multielectrode investigations. We derived an equation to calculate parameter-sensitivity maps for arbitrary surface geoelectric arrays and all these maps were presented. We illustrated the usefulness of these maps through examples. We calculated furthermore the Roy and Apparao-, and Edwards-type depth of detection values for 30 different arrays, the resolution values of these arrays, the relation between the depth of investigation values and those of the resolution values and the relation between the depth of investigation values and the noise level, as well. Moreover, we give here the so-called depth of detectability values of 6 arrays for different models assuming different noise levels. The aforementioned theoretical investigations served as a basis for planning the field measurements. First of all, the real positioning errors were measured under different field conditions and the effect of this error type in the case of different multielectriode arrays was calculated. Tensorial geoelectric measurements were carried out, as well. We tested the applicability of 3D electrical resistivity tomography technique to detect landmines in different soil conditions and at various depths. We elaborated moreover a geoelectrical procedure which is able to map multidirectional fissure systems. We presented the so-called standardized pricking probe surveying technique and demonstrated its usefulness in an archaeological study. It should be mentioned, that this paper does not contain details. If the reader would like to reproduce the results demonstrated on the figures, the referred previous publications of the authors should be studied.

Beérkezett: 2010. december 14.; *elfogadva:* 2011. február 22.

ISSN 0025-0120 © 2010 Magyar Geofizikusok Egyesülete

Eredményeinkből

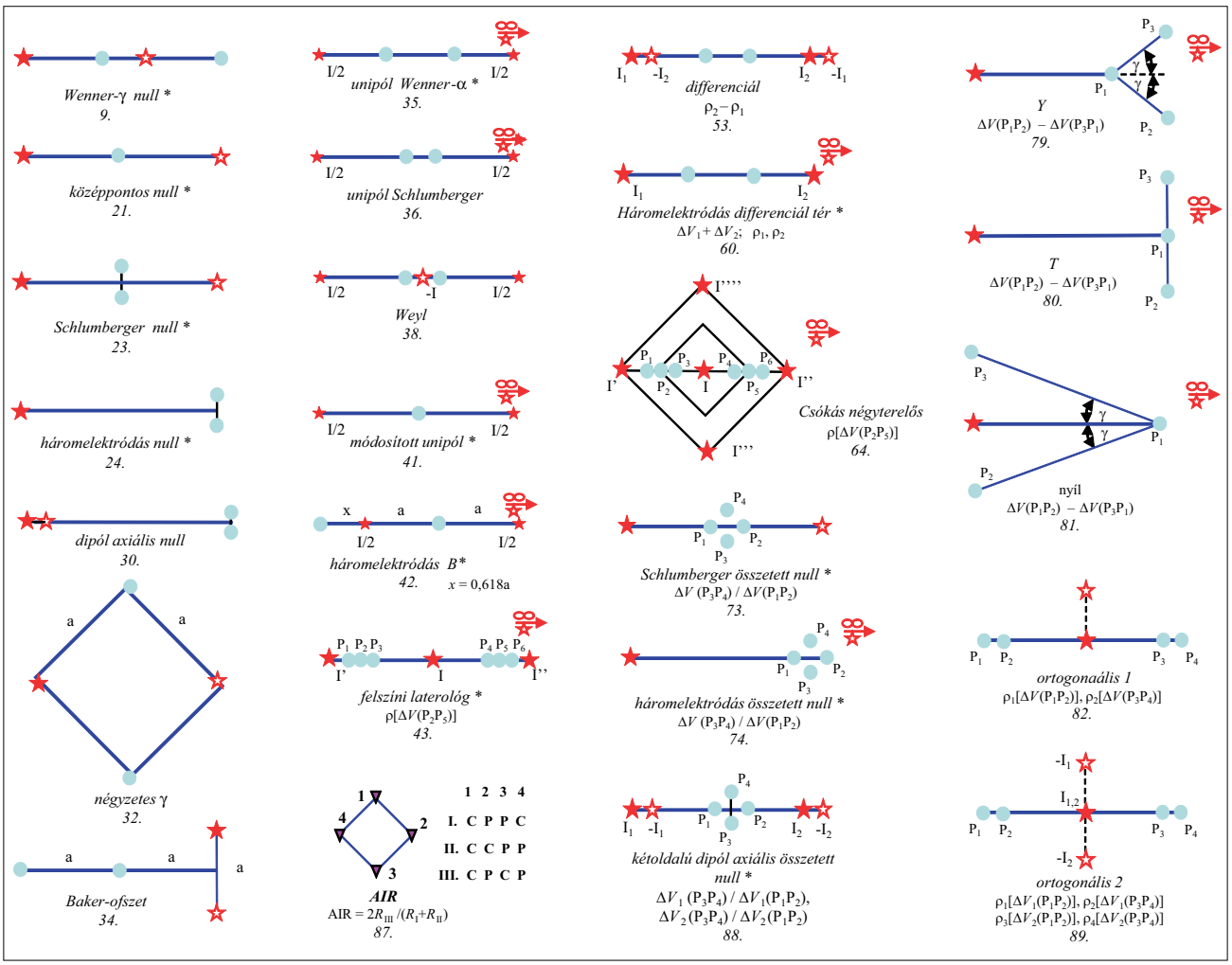
1. Az összes valaha használt elrendezés összegyűjtése és osztályozása

Annak érdekében, hogy nem konvencionális elrendezéseinket el tudjuk helyezni az összes eddig használt elrendezés között, valamint hogy lássuk, milyen hasonló elrendezéseket hoztak létre korábban, milyen elrendezésekkel próbálták elérni azokat a célokat, amelyeket mi is kitűztünk maguk elé, és hogy elrendezéseinket majd a többi elrendezéssel vagy azok egy csoportjával összehasonlíthassuk, összegyűjtöttük és osztályoztuk az összes az angol és az orosz nyelvű szakirodalomban megjelent eddig használt elrendezést (Szalai, Szarka 2007a, Szalai, Szarka 2008a). Összesen 92 + 10 db elrendezést gyűjtöttünk össze és ábrázoltunk egységes jelölésrendszerrel, valamint megadtuk az egyes elrendezések szakirodalmi forrásait. Az elrendezések osztályozása 3 paraméter alapján történt, és így mindösszesen 2^3 csoportot képeztünk az összes elrendezésből. Példaként az egyes csoportokon átívelő elrendezések, az ún. nullelrendezések halmazát mutatjuk be *(1. ábra)*, melyek vizsgálata kutatásunk egyik fő irányát jelentette.

Ez az elrendezésgyűjtemény képezte az alapját számos további – elsősorban összehasonlító – vizsgálatnak.

2. A felszíni elektródaelrendezések megalkotásánál alkalmazott stratégiák

A fenti gyűjtemény szolgált alapjául az egyes elrendezések között lévő, különböző összefüggések megvilágításának, illetve annak, hogy lássuk, azok milyen célok által vezérelve jöttek létre. A fő célokat négy csoportba sorolhatjuk, és azon belül 11 alstratégiát különíthetünk el *(1. táblázat)*. Megállapítottuk, hogy új elrendezések létrehozását leggyakrabban praktikus okok motiválták (61 ilyen elrendezést találtunk), mint pl. hogy kevesebb elektródát kelljen mozgatni a mérés során, vagy hogy a mért jel a lehető legnagyobb legyen. Szintén fontos szempont volt az új elrendezések létrehozásánál, hogy azok a lokális inhomogenitásokra, illetve az



1. ábra A *2a* nullelrendezések alstratégiának megfelelő elrendezések. A teli csillagok a forrás-, az üresek a nyelő áramelektródákat, a körök a potenciálelektródákat jelölik

Figure 1 Solution techniques *2a* ("Null arrays"). Source/sink electrodes are full/empty stars. Full circles: potential electrodes

1. táblázat | Geoelektromos elrendezések kialakítása során alkalmazott stratégiák

Általános megfontolás (stratégia)	Cél	Megoldás (alstratégia)	Elrendezések száma	
Praktikus okok (1.)	A jel növelése	C közelíti P-t – *(1a)*	9	61
	Kevesebb elektródát kell mozgatni	C és/vagy P a végtelenben – *(1b)*	21	
	Kevesebb kábel szükséges	Dipól – *(1c)*	13	
	Nem kell minden elektródát mozgatni a térképezéshez	Nem minden elektróda mozog – *(1d)*	10	
	Korlátozott hozzáférésű területen végrehajtandó mérés	Aszimmetrikus – *(1e)*	8	
Az anomália „megtisztítása” magával a mérési módszerrel (2.)	„Tiszta” anomáliát kapjunk	Null – *(2a)*	25	36
	A felszín közeli inhomogenitások hatásának kiküszöbölése	Ofszet – *(2b)*	2	
		Differencia – *(2c)*	2	
		Kétoldalú – *(2d)*	5	
		Az elektródák identitása változik – *(2e)*	2	
A helyi inhomogenitás és/vagy anizotrópia tanulmányozása (3.)	*x* irányú (szelvényirány-) változások	Lee típusú – *(3a)*	3	54
		Deriváló – *(3b)*	12	
	y irányú változások	Vektor – *(3c)*	5	
		Tenzor – *(3d)*	5	
		További nem vonal elrendezések – *(3e)*	16	
	z (függőleges) irányú változások	Miniszondázás – *(3f)*	11	
		Mélységi differenciálás – *(3g)*	2	
A kutatási mélység növelése (4.)	A kutatási mélység növelése	Fókuszálás – *(4)*	17	17

anizotrópiára érzékenyek legyenek (54 elrendezés). Ezek az elrendezések ugyanakkor az előbbieknél ritkábban használatosak a terepen, inkább speciális esetekben alkalmazzák ezeket. Sok (36) olyan elrendezést is találtunk, amelyek célja magának a mérési procedúrának segítségével megszabadulni a geofizikus számára hasznos információt nem szolgáltató, azaz zajként értelmezhető geológiai eredetű információktól.

Utóbbiak közül ráadásul meglepően nagyszámú (25) a nullelrendezések csoportja *(1. ábra)*. Jól láthatóan tehát számos próbálkozás történt már a nullelrendezések használatára (példák Szalai és Szarka 2008a-ban) és ezek jelentős része sikeres is volt, de használatuk – elsősorban terepi kivitelezésük bonyolultságának következtében – nem terjedt el. Ezért tűnt célszerűnek olyan nullelrendezések vizsgálata, amelyek terepi körülmények között is könnyen alkalmazhatók (Szalai et al. 2002). Mivel azonban nemlineáris voltuk miatt még ezek használata is viszonylag körülményes, és mivel a napjainkra rendkívül elterjedt 2D sokelektródás rendszerekbe nem építhetők be, további geometriai (azaz nem fókuszált, nem *superposed*) nullelrendezéseket kellett keresnünk és vizsgálnunk. A két vizsgált ilyen elrendezés, a Wenner-γ-, null- és a MAN-elrendezés közül a MAN, vagy más néven középpontos nullelrendezés tűnik reménykeltőbbnek.

Az utolsó „stratégiai” csoport, amely eredetileg a kutatási mélység növelését célozta meg, azért említésre méltó esetünkben, mert az ott alkalmazandó technikát, az áramfókuszálást szintén vizsgáltuk jelen OTKA keretében. El akarván azonban kerülni ebben az esetben is a bonyolult terepi procedúrát, az áram fókuszálását szintetikusan végeztük, úgy állítva be az egyes áramelektródák által kibocsátott áram erősségét, hogy az áramvonalak a számunkra érdekes helyeken függőlegesen lefelé irányuljanak.

Az egyes elrendezések között érdekes összefüggések tárhatóak fel. Bemutattuk, hogy egyes elrendezésekből kiindulva hogyan juthatunk el 1, 2 vagy 3 lépésben, azaz ennyi tulajdonság megváltoztatásával különböző, már használt elrendezésekhez (Szalai, Szarka 2007b). A Schlumberger „család” az anyaelrendezéssel együtt 20, a dipól axiális elrendezés családja 21, míg a pole–dipole elrendezés családja pl. 19 elrendezést foglal magában az ismert elrendezések közül, azaz ez a három elrendezéscsalád az összes ismert elrendezés mintegy 60%-át fedi le.

Megvizsgáltuk azt is, hogy mely stratégiák multielektródás rendszerekbe történő integrálása lehet a legered-

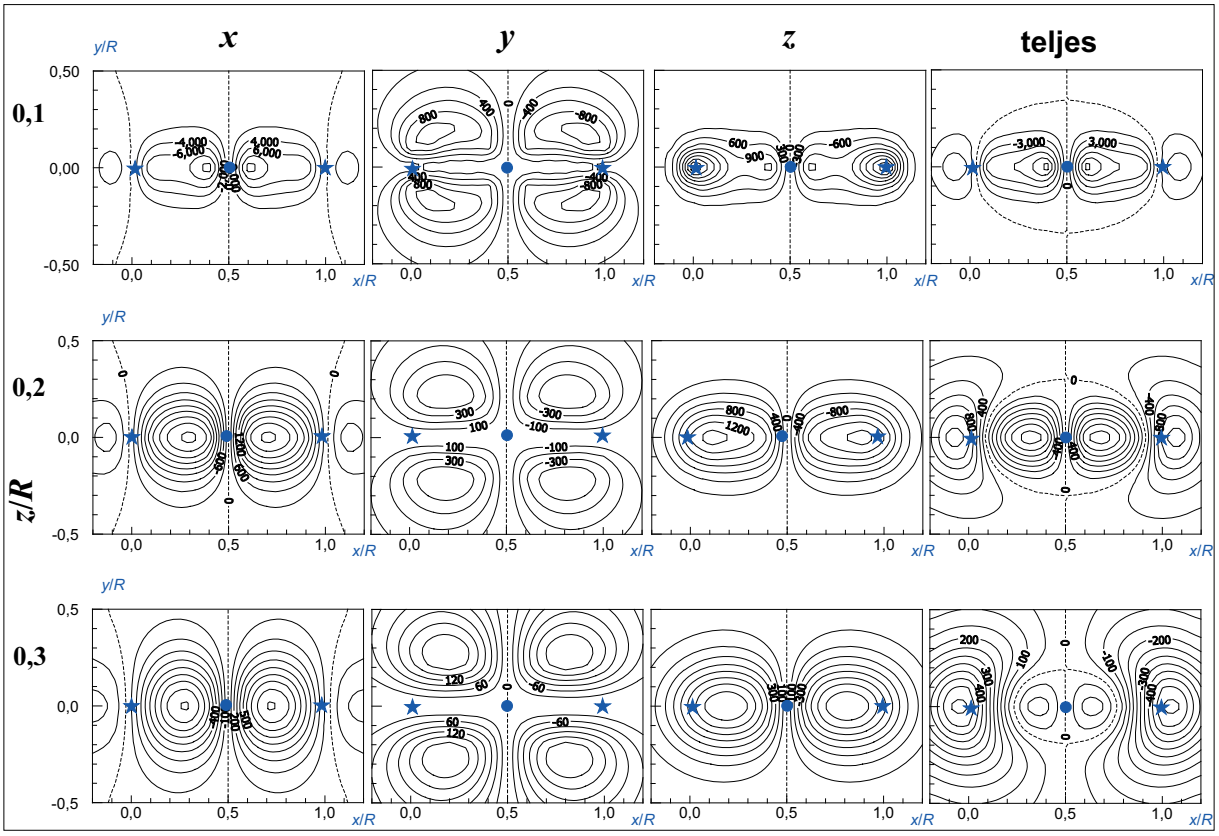
ményesebb. A legcélszerűbbnek azon elrendezések multielektródás rendszerekbe történő integrálása látszik, amelyek segítségével annak kutatási mélysége, vagy felbontóképessége megnövelhető lehet. A kutatási mélység növelése valamely elektróda végtelenbe távolításától (*1b.* alstratégia), vagy a nullelrendezések alkalmazásától (*2a.*) várható leginkább. A nullelrendezésekre vonatkozó ezen állításunkat numerikus modellezési vizsgálatok (Szalai et al. 2005a), a jelen OTKA keretében elvégzett analóg modellezési vizsgálatok és terepi vizsgálatok (Szalai et al. 2002) támasztják alá.

A vertikális felbontóképesség növekedése az áram-, és a potenciálelektródák egymáshoz közelítésétől (*1a.*) várható leginkább (Szalai et al. 2009c), míg a horizontális felbontóképesség a deriválási stratégiát követve (*3b.*) növelhető a legnagyobb valószínűséggel. A fókuszálási technikától (*4.*) a szerzők a hatók jobb felszíni leképezését várják, szemben az általában várt kutatási mélység növekedéssel (Szalai et al. 2007, Szalai et al. 2009c). Az aszimmetrikus elrendezések stratégiája (*1e.*) az információszerzés területét kísérli meg megnövelni, aminek elsősorban beépített területeken lehet nagy jelentősége. A *2b–e.* stratégiák integrálásával a felszín közeli inhomogenitások hatása távolítható el, ami a ténylegesen vizsgálni kívánt tartományok jobb megismerését segítheti elő.

A többi stratégia vagy nem építhető be a 2D multielektródás rendszerbe, vagy abba automatikusan beépül. Különösen perspektivikusnak tartjuk komplementer tulajdonságokkal rendelkező elrendezések, így pl. a nagy kutatási mélységgel (ugyanakkor kis vertikális felbontóképességgel) és nagy felbontóképességgel (ugyanakkor kis kutatási mélységgel) rendelkező elrendezések (Szalai et al. 2009c) együttes használatát és inverzióját a multielektródás rendszerekben.

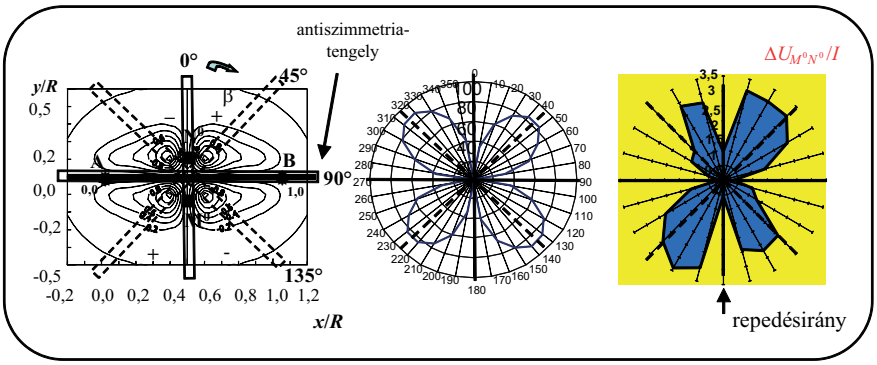
3. A felszíni elektródaelrendezések paraméterérzékenység-térképei

A fenti elrendezésgyűjtemény megteremtette az alapját az egyes elrendezések különböző paraméterek alapján történő összevetésének. Elsőként az elrendezések paraméterérzékenység-térképeit (PÉT) vizsgáltuk. A PÉT-ek ábrázolásához levezettünk egy analitikus megoldást (Szalai, Szarka 2008b). Ez a megoldás lehetővé teszi bármely felszíni elektródaelrendezés esetére számítani a PÉT-eket, beleértve a nemlineáris és a fókuszált elrendezéseket, illetve azok bármely kombinációját. Bár ez a megoldás alkalmas lenne dipólelrendezések kezelésére is, ahhoz praktikus okokból a Szalai és Szarka (2000) cikkben megadott, szintén analitikus megoldást használtuk inkább. Példaként a *2. ábrán* a sokat tanulmányozott MAN-elrendezés PÉT-jeit mutatjuk be. A fenti analitikus megoldások ráadásul nemcsak a kisméretű 3D ható által adott választ képesek megadni, hanem a ható az egyes tengelyek irányára merőleges oldalpárjainak



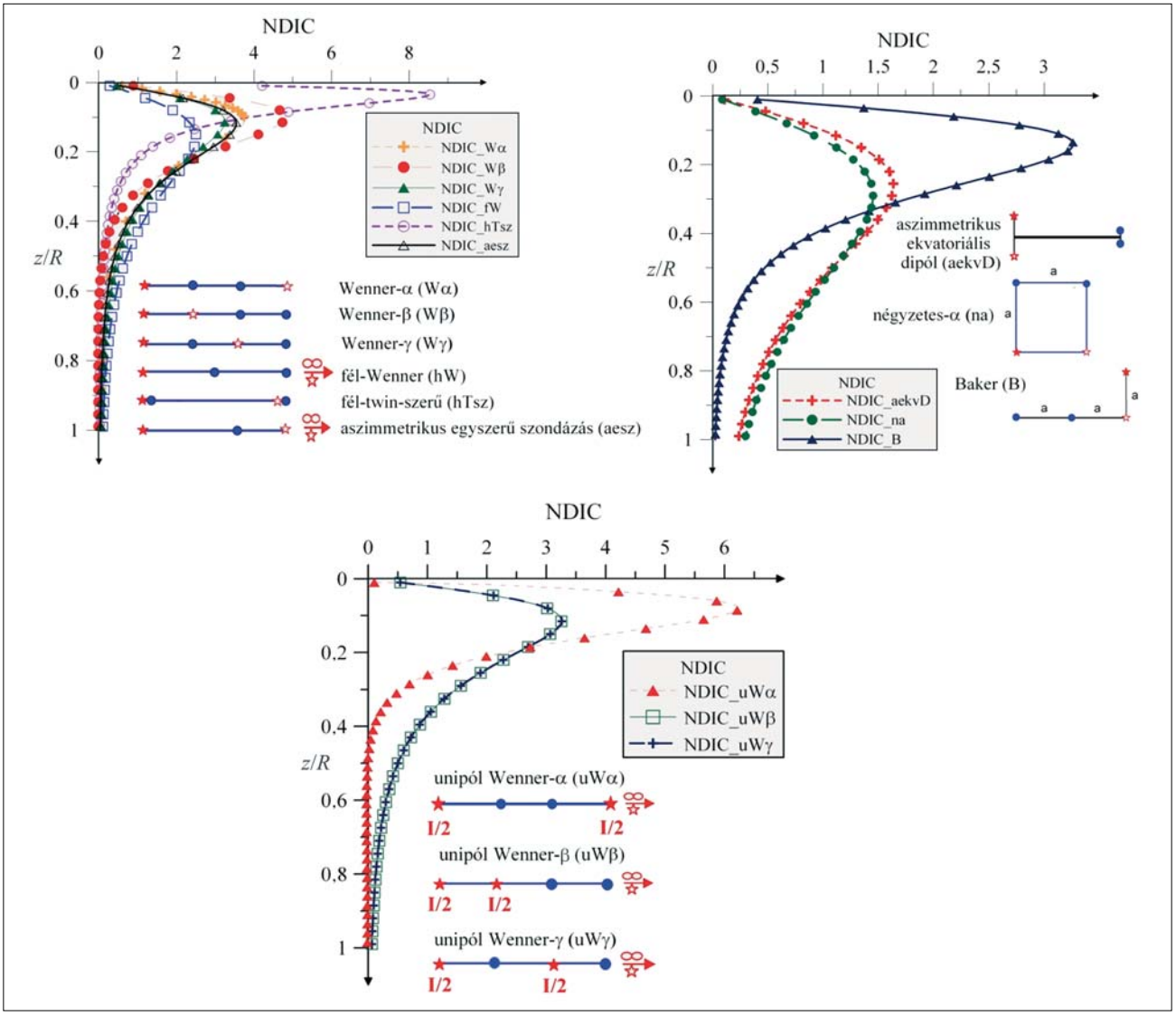
2. ábra | A MAN-elrendezés paraméterérzékenység-térképei. A jelölések mint az *1. ábrán*

Figure 2 | Parameter-sensitivity map series of the MAN array. For notations see *Fig. 1*



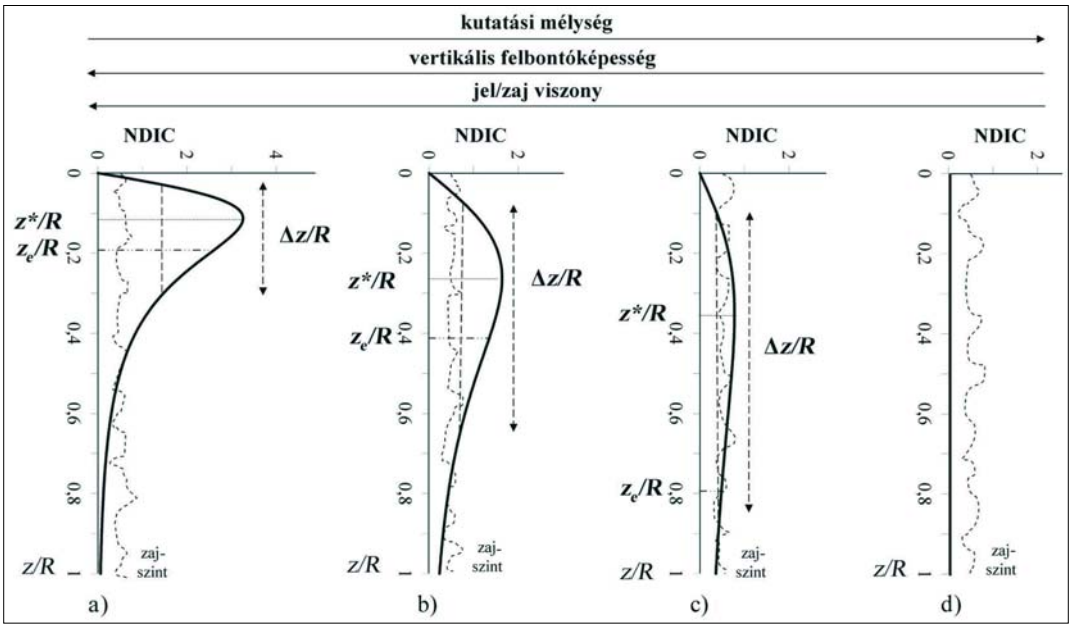
3. ábra a) Annak illusztrálása, hogy hogyan jósolható meg az azimutális mérés eredményeként kapott sugárdiagram alakja szimmetrikus inhomogenitás felett dipól axiális nullelrendezéssel végrehajtott mérés esetén; b) analóg azimutális mérés eredménye; c) terepi mérés eredménye repedés felett

Figure 3 a) Illustration how to predict the shape of the rose diagram constructed from dipole axial null array measurement results obtained above a symmetrical inhomogeneity; b) polar diagram from physical model experiment; c) polar diagram measured in the field above a fissure filled by clay



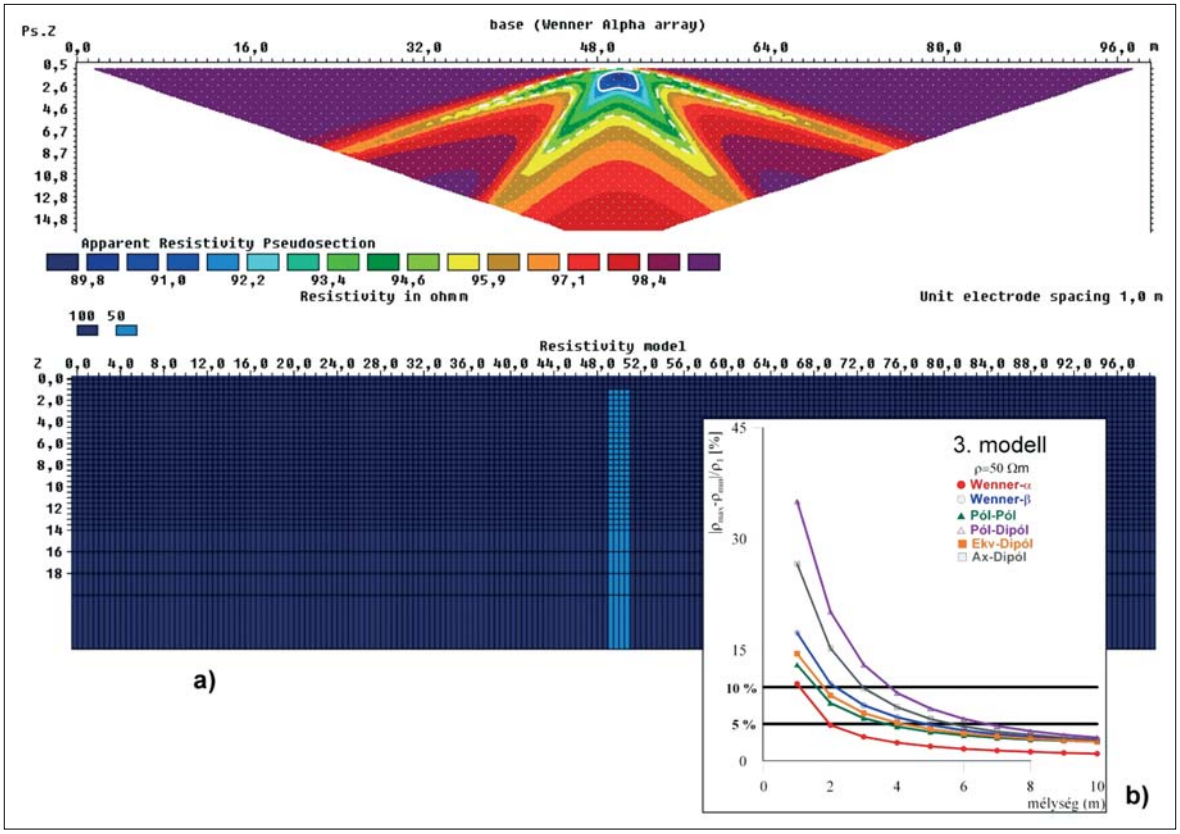
4. ábra Mélységérzékenység karakterisztikafüggvények néhány elrendezésre. Bal fent: vonalelrendezések; jobb fent: nem vonal elrendezések; alul: fókuszált elrendezések

Figure 4 DIC functions of several arrays. top left: linear arrays; top right: non-linear arrays; bottom: focussed dipole arrays



5. ábra Különböző típusú mélységérzékenység karakterisztikafüggvények néhány kiválasztott elrendezés példáján (balról jobbra: Wenner-γ-, aszimmetrikus dipól ekvatoriális, pól–pól, MAN-elrendezések), z^*/R és $\Delta z/R$ értékeik, egy feltételezett zajszinttel. A vízszintes nyilak a növekvő értékek irányába mutatnak

Figure 5 Types of the DIC function shown on selected arrays (from left to right: Wenner-γ, asymmetrical dipole equatorial, pole–pole and MAN array), their z^*/R and $\Delta z/R$ values, together with a hypothetical noise level. Horizontal arrows point toward increasing values



6. ábra a) A kimutathatósági mélység értékének megállapítása 5%-os (szaggatott fehér vonal), ill. 10%-os (folytonos fehér vonal) zajszint esetén. b) A kimutathatósági mélység érték megállapításának menete

Figure 6 a) Determination of the DD value in case of 5% noise level (white dotted line), and 10% noise level (white continuous line); b) The process to determine the DD value

2. táblázat Geoelektromos elrendezések Roy és Apparao (1971), illetve Edwards (1977) szerinti kutatási mélység értékei: z^*/R és z_e/R. Az α10, β45, γ45, γ40, γ10 nevek előzetes nevek, az elrendezés elektródáinak pozícióira utalnak

			No.	Elrendezés neve	z^*/R	z_e/R	x_A	y_A	x_B	y_B	x_M	y_M	x_N	y_N
nem fókuszált vonalelrendezés	négyelektródás	α-típusú	1	Schlumberger (α45)	0,125	0,19	0	0	1	0	0,45	0	0,55	0
			2	Wenner (α33)	0,105	0,175	0	0	1	0	0,333	0	0,666	0
			3	α10	0,035	**0,075**	0	0	1	0	0,1	0	0,9	0
		β-típusú	4	β45	0,035	**0,06**	0	0	0,45	0	0,55	0	1	0
			5	Wenner-β (β33)	0,1	**0,14**	0	0	0,333	0	0,666	0	1	0
			6	β10	0,175	**0,225**	0	0	0,1	0	0,9	0	1	0
			7	dipól axiális (β20)	0,19	0,245	0	0	0,02	0	0,98	0	1	0
			8	aszimmetrikus dipól axiális (β10)	0,145	**0,19**	0	0	0,1	0	0,7	0	1	0
		γ-típusú	9	γ45	0,035	**0,06**	0	0	0,55	0	0,45	0	1	0
			10	γ40	0,057	**0,06**	0	0	0,6	0	0,4	0	1	0
			11	Wenner-γ (γ33)	0,115	**0,2**	0	0	0,666	0	0,333	0	1	0
			12	γ10	0,035	**0,075**	0	0	0,9	0	0,1	0	1	0
	háromelektródás		13	pól-dipól	**0,235**	0,365	0	0	100	0	0.9	0	1	0
			14	fél-Wenner	**0,16**	**0,26**	0	0	100	0	0,5	0	1	0
			15	fél-twin-szerű	**0,035**	**0,075**	0	0	100	0	0,1	0	1	0
			16	aszimmetrikus egyszerű szondázás	**0,12**	**0,185**	0	0	1	0	0,6	0	100	0
			17	pól-pól	0,355	0,8	0	0	-100	0	1	0	100	0
nem fókuszált nem vonalelrendezés	dipól-dipól		18	azimutális dipól $0° < \vartheta \leq 90°$	0,25	**0,385**								
			19	merőleges dipól $0° < \vartheta < 90°$	0,205	**0,285**								
			20	radiális dipól $0° \leq \vartheta < 90°$	0,195	**0,255**								
			21	párhuzamos dipól $0° \leq \vartheta \leq 40°$	~0,19	**~0,24**								
			22	párhuzamos dipól $40° < \vartheta < 80°$	**instabil**	**instabil**								
			23	párhuzamos dipól $80° \leq \vartheta \leq 90°$	~0,255	**~0,395**								
	nem dipól		24	aszimmetrikus ekvatoriális bipól	**0,26**	**0,4**	0	0,1	0	-0,1	1	0,3	1	-0,3
			25	négyzetes-α	**0,29**	**0,45**	0	0	1	0	0	1	1	1
			26	Baker	**0,14**	**0,2**	0	0	0,5	0	1	0	1	0,5
fókuszált			27	unipól Wenner-α	**0,08**	**0,11**	0	0	1♦	0	0,333	0	0,666	0
			28	unipól Wenner-β	**0,115**	**0,2**	0	0	0,333	0	0,666	0	1♦	0
			29	unipól Wenner-γ	**0,115**	**0,2**	0	0	0,666	0	0,333	0	1♦	0
			30	módosított unipól	0,16	0,415	0	0	1♦	0	0,5	0	100	0

hatását is. Ezeket a paramétereket külön-külön is ábrázoltuk 3 különböző mélységben az összes olyan elrendezésre, amelyek esetében a PÉT-ek számítása lehetséges. A térképeket Szalai és Szarka (2008b), valamint Szalai és Szarka (2008c) munkái tartalmazzák.

A PÉT-ek használatát a Schlumberger-féle nullelrendezés példáján keresztül mutatjuk be (Szalai, Szarka, 2006, ill. Szalai, Szarka, 2008b nyomán). Mivel a PÉT-ek komponenstől és mélységtől függetlenül a dipólok középpontjait összekötő egyensen átmenő vertikális síkra antiszimmetrikusak *(3. ábra),* az antiszimmetriasík két oldalán attól egyforma távolságra lévő kis hatók éppen annulálják egymást. Ezért ez a nullelrendezés pl. nemcsak homogén féltér, hanem bármely, erre a síkra szimmetrikus ható felett elméletileg nulla jelet ad. Ez a tulajdonság szinte minden terepi alkalmazásra esélyes nullelrendezés esetében fennáll, és reményeink szerint ez a nullelrendezések egyik jól kiaknázható tulajdonsága lesz. Ezt alátámasztják numerikus vizsgálataink is, de azok terepi megerősítéséhez még megfelelő teszterületen végrehajtott mérések szükségesek. Fenti állításokat a MAN-elrendezésre is érvényesek, jóllehet annak csak egy antiszimmetriatengelye van, és az az elrendezés vonalára merőleges.

4. Kutatási mélység-, és felbontóképesség-számítások

A PÉT-ek számításához adott levezetést felhasználva tudtuk számítani adott mélységben elhelyezkedő vékony rétegek hatását bármely felszíni elektródaelrendezésre (Szalai et al. 2007b, Szalai et al. 2009c). Ily módon számíthatók a kutatási mélység karakterisztikafüggvényei (néhány példa a *4. ábrán* látható), amelyek maximumának helye megadja egy adott elrendezés Roy és Apparao-féle kutatási mélységét (Roy, Apparao 1971), a görbe alatti integrál felének megfelelő mélységérték pedig az Edwards-féle mélységértéket (Edwards 1977). Meghatároztuk mindkét mélységértéket az összes lehetséges (30 db) elrendezés esetére *(2. táblázat)* és kimutattuk, hogy a kétféle mélységérték között gyakorlatilag egyenes arányosság áll fenn, az Edwards-féle kutatási mélység értéke megközelítőleg 1,6-szerese a Roy és Apparao-féle mélységértékeknek.

Kimutattuk, hogy a tapasztalatokkal egyetértésben a kutatási mélység és a vertikális felbontóképesség között közel fordított arányosság áll fenn. A leggyakrabban használt (Wenner-α-, Wenner-β-, Schlumberger-, dipól–axiális és pól–dipól) elrendezések elfogadható kompromisszumot nyújtanak e között a két paraméter között. A kutatási mélység növelhető pl. a pól–pól elrendezés használatával, a vertikális felbontóképesség pedig pl. az α10 vagy a γ10 elrendezések használatával. Az áramfókuszálás ugyanakkor a várttal szemben nem vezet a kutatási mélység e definíció szerint számított értékének növekedéséhez.

Felhívtuk a figyelmet arra is, hogy a kutatási mélység értékek a zajjal szorosan összefüggenek *(5. ábra)*. Az információszerzés mélységének elvileg csak a zajok szabnak határt, azok mértékének ismeretében megfelelő elrendezés alkalmazásával a kutatási mélység elméletileg sokszorosára növelhető. Többek között emiatt is kezdtünk szisztematikus zajvizsgálatokba, amelyek első lépéseként azokat a hibákat vizsgáltuk, amelyek a multielektródás elrendezés elektródáinak pontatlan pozicionálásából adódnak (lásd a 6. pontot).

5. Kimutathatósági mélységvizsgálatok különböző modellek esetére

Bevezettünk egy olyan, az információszerzés mélységére vonatkozó, a zajokat is figyelembe vevő újfajta kutatási mélységdefiníciót, amely emellett a jelen kihívásainak is

3. táblázat | Különböző modellek kimutathatósági mélysége méterben hat különböző elrendezés esetén különböző zajszinteket feltételezve

modell / elrendezés	Véges kiterjedésű (2D) modell								Végtelen kiterjedésű (1D) modell			
	négyzet alapú hasáb				dyke				1D vékony réteg			
	1. modell (ρ_a = 10 Ωm)		2. modell (ρ_a = 1000 Ωm)		3. modell (ρ_a = 50 Ωm)		4. modell (ρ_a = 200 Ωm)		5. modell (ρ_a = 50 Ωm)		6. modell (ρ_a = 200 Ωm)	
zaj-szint	*5%*	*10%*	*5%*	*10%*	*5%*	*10%*	*5%*	*10%*	*5%*	*10%*	5%	10%
P-DP	6,63	4,17	5,67	3,79	5,78	3,12	7,13	4,28	3,78	1,66	3,89	1,80
DP-ax.	7,85	5,01	5,38	3,59	5,62	2,96	6,88	4,03	4,88	2,06	5,09	2,21
W-β	6,89	4,31	4,15	2,61	4,86	2,11	3,25	1,61	4,19	1,89	4,34	2,04
W-α	3,56	2,03	2,77	1,77	1,96	1,05	2,5	1,14	3,59	1,58	3,71	1,72
DP-ekv.	7,88	4,81	2,99	1,89	4.15	1,72	2,15	1,08	3,60	1,58	3,72	1,72
P-P	5,06	3,09	2,86	1,82	3,63	1,48	2,07	0,998	2,46	1,04	2,57	1,19

4. táblázat | A vizsgált elrendezések DD és DIC értékekből kapott helyezéseinek összevetése

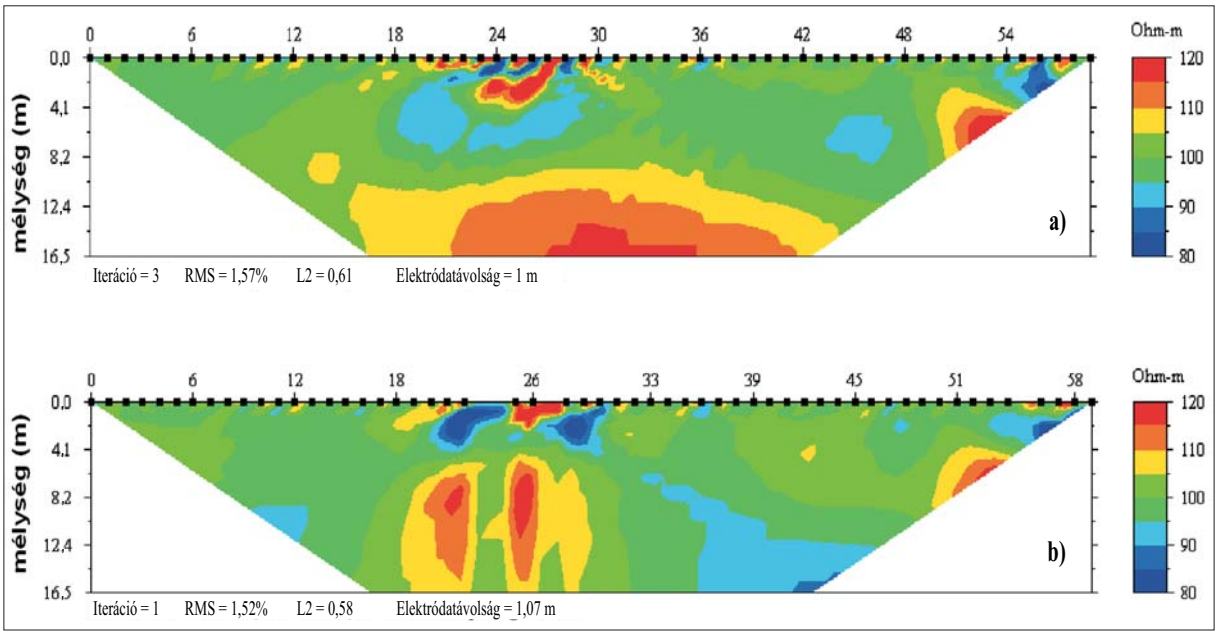
	1. modell (2D), 5% zaj		viszony	6. modell (1D), 5% zaj	
	DD (m)	helyezés		DD (m)	helyezés
P–DP	7,07	3	~	3,80	3
DP-ax.	7,81	1~2	~	4,87	1
W-β	6,99	4	>	4,22	2
W-α	3,58	6	>	3,65	4~5
DP-ekv.	7,86	**1~2**	<	3,65	**4~5**
P–P	5,00	5	<	2,57	6

megfelelve már a multielektródás elrendezések információszerzési mélységéről mond valamit (Novák et al. 2006, Szalai et al. 2010a). Ezt kimutathatósági mélységnek nevezzük, és azt a mélységet jelenti, amely mélységből – adott felszíni egyenáramú elrendezés segítségével – a kutatandó objektum egy adott zajszint mellett még kimutatható (lásd *6. ábra*). 6 különböző elrendezésre és 6 különböző modellre vizsgáltuk 2 zajszint esetén a kimutathatósági mélységértékeket numerikus modellezést alkalmazva *(3. táblázat)*.

Kimutattuk többek között, hogy a legnagyobb mélységből adott zajszint mellett általában a pól–dipól, a dipól axiális és a Wenner-β-elrendezések képesek detektálni az anomális testeket, legkevésbé hatékonynak általában a pól–pól elrendezés bizonyult, míg a Wenner-α- és dipól ekvatoriális elrendezések általában közepes hatékonyságúak voltak. A zajszint változása az elrendezések sorrendjén nem változtatott, de a meghatározott mélységértékekre természetesen erős hatással volt. Kimutattuk, hogy bizonyos modellek esetén (pl. négyzet alapú hasábmodell) egyes elrendezések a nagy fajlagos ellenállású (pl. pól–dipól), míg mások (pl. pól–pól) a nagy fajlagos vezetőképességű anomáliákat képesek nagyobb mélységből kimutatni. Más modellek esetében (pl. vékonyréteg-modell) az ellenálláskontraszt előjelének változása nem vezet jelentős különbséghez a kimutathatósági mélység értékek tekintetében.

Kimutattuk azt is, hogy az elrendezések „helyezési sorrendje” erősen modellfüggő *(4. táblázat)*. A dipól ekvatoriális elrendezés, pl. a hasábmodell esetében 1–2., míg a vékonyréteg esetében mindössze a 4–5. helyet foglalja el. Érdemesnek látszik ennek alapján a priori ismereteink birtokában a *3. táblázatnak* megfelelően kiválasztani a terepi méréseink során a használandó elrendezést.

Mindenképpen elgondolkodtató és további vizsgálatokra sarkall bennünket a kimutathatósági mélységértékek és a



7. ábra | A pól–dipól elrendezés ellenállás invertált pszeudoszelvénye, mikor is $|\mathbf{r}_{ideal} - \mathbf{r}_{real}|$ értékét minimalizáltuk, a) az összes elektróda figyelembevételével, b) négy olyan elektróda (23, 24, 27 és 55) eltávolításával, amelyeknél az *x* irányú pozicionálási hiba meghaladta a 15 cm-t

Figure 7 | Inverted resistivity pseudosection for the PDP array, where $|\mathbf{r}_{ideal} - \mathbf{r}_{real}|$ was minimised. a) Considering all electrodes, b) removing four electrodes (23, 24, 27 and 55), where the positioning error in *x* direction was larger than 15 cm

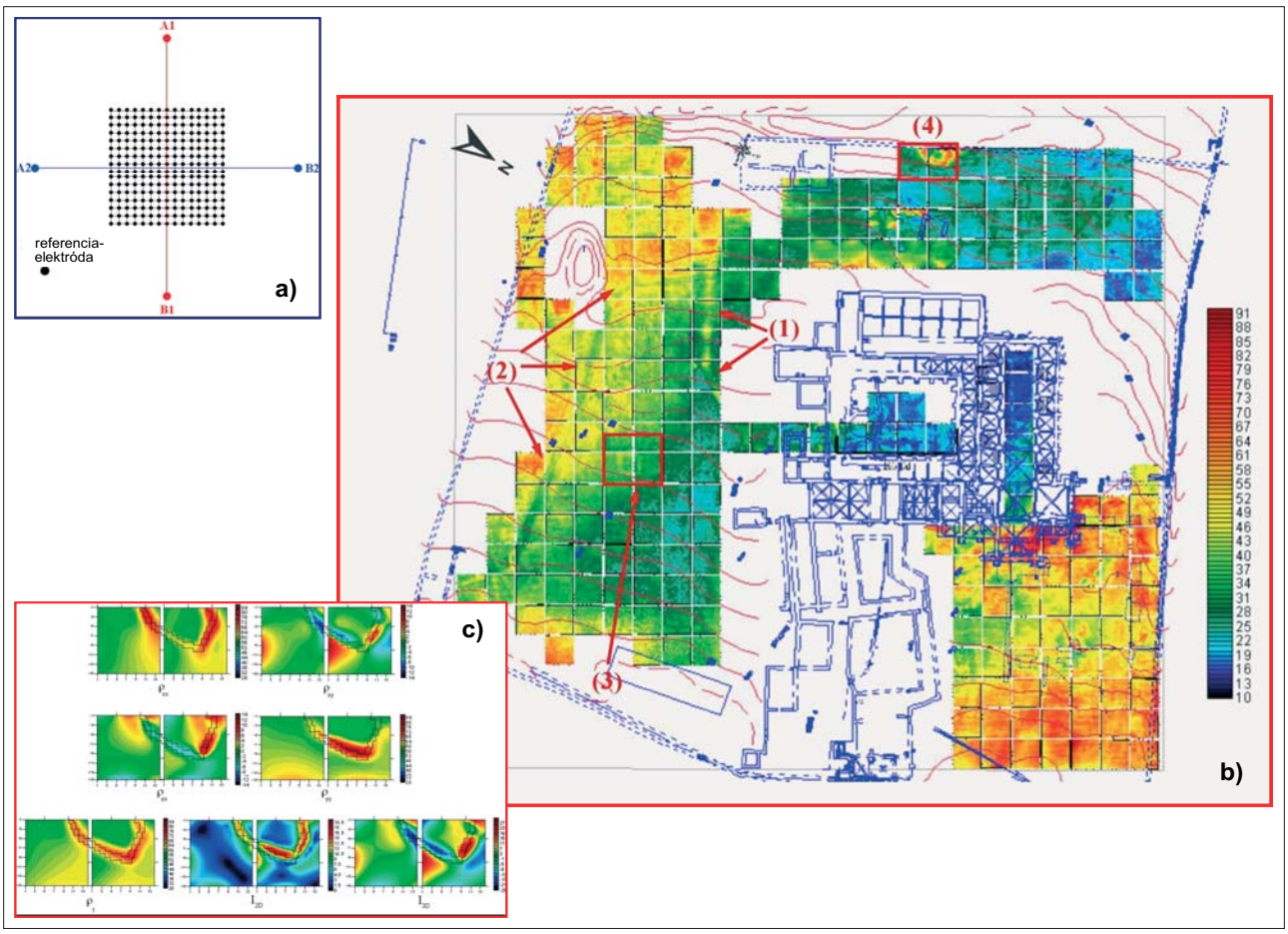
kutatási mélységértékek nagyfokú eltérése. A jólvezető hasábmodell pl. a pól–dipól elrendezéssel mutatható ki a legnagyobb mélységből, míg a kutatási mélysége ennek az elrendezésnek a vizsgált 6 elrendezés közül csak az 5. volt (Szalai et al. 2010a).

6. Sokelektródás elrendezések elektródáinak pontatlan pozicionálásából eredő hibák vizsgálata

Egy szisztematikusnak szánt zajvizsgálati sorozat első elemeként számítottuk az elektródák pontatlan pozicionálásából eredő (azaz geometriai eredetű) hibák hatását különböző sokelektródás elrendezések esetére (Szalai et al. 2007a, 2008a).

Terepi körülmények között a legnagyobb elővigyázatosság ellenére sem tudjuk az elektródákat tökéletesen a helyükre illeszteni. A legnagyobb hibák okai a sűrű aljnövényzet, a változó topográfia vagy a nagyon köves talaj lehetnek. Az ezekből eredő hibák pedig megjelennek a mért adatokban, torzítva azokat. Hogy a valóságban mekkorák ezek a pozicionálási hibák, azt lézeres távolságmérő segítségével mértük meg különböző terepi körülmények között. Kiszámítottuk, hogy ezek a pozicionálási hibák mekkora hibákhoz vezetnének a mért fajlagosellenállás-értékekben, ha homogén féltér felett hajtanánk végre méréseket.

A *7.a ábra* mutatja a pól–dipól invertált szelvényeket köves felszínen mérve, ahol a kövek miatt nem vagyunk képesek az elektródákat megfelelően pozicionálni. Jól látható, hogy ilyen esetben a pozicionálási hibák jelentős, akár 20%-os álanomáliák kialakulásához is vezethetnek még akkor is, ha a legmegfelelőbbnek tűnő megoldást választva, elektródánkat az ideálishoz legközelebbi pozícióba helyezzük el, azaz $|\mathbf{r}_{\text{ideális}} - \mathbf{r}_{\text{valódi}}|$ értékét minimalizáljuk. Mivel ilyen esetben tudjuk, hogy mely elektródák pozíciója nagyon pontatlan, azok hatását eltávolíthatjuk, de az invertált kép még így, adatveszteséggel is álanomáliáktól nagymértékben ter-



8. ábra a) A mérési elrendezés. Az elektródák távolsága 50 cm egymástól; b) a látszólagos fajlagos ellenállástenzor determinánsának térképe a pilisszentkereszti Cisztercita Apátság romjainak képével, c) 3D numerikus modellezés eredményei a kemence modellre. 1–2. sor: Az ellenállás tenzor *xx*, *xy*, *yx*, *yy* elemeinek térképei. 3. sor: WAL-invariánsok egyenáramú megfelelői (I_{1D}, I_{2D}, I_{3D}). Az *x* irány a horizontális. Az ellenállásadatok ohmm-ben, I_{2D} és I_{3D} pedig %-ban adottak

Figure 8 a) The layout of the tensorial resistivity mapping. Electrode distance: 50 cm; b) apparent resistivity map (given in ohm-meters), together with the map of the monastery complex. c) Numerical results over the furnace model. Rows 1–2: maps of ρ_{xx}, ρ_{xy}, ρ_{yx} and ρ_{yy} elements of the resistivity tensor. Row 3: the DC versions of the WAL invariants (ρ_{I1}, I_{2D} and I_{3D}). The *x* direction is horizontal. The resistivities are given in ohm-meters; I_{2D} and I_{3D} are given in percents

helt lesz *(7.b ábra)*. Jobb megoldás $|\mathbf{x}_{\text{ideális}} - \mathbf{x}_{\text{valódi}}|$ értékének minimalizálása (ahol **x** a profil iránya), ráadásul olyannyira, hogy elektródánkat a profilra merőlegesen még 4–5-szörösével jobban „félrepozicionálva" is kisebb hibákat kapunk, mint kismértékű profil menti félrepozicionálás esetén.

Megállapítottuk, hogy a pozicionálási hibák normál körülmények között, azaz olyan helyeken, ahol az elektródák pontos elhelyezésének fizikai akadálya nincs, jelentéktelenek. Ahol pedig a pontos elektróda pozicionálásnak fizikai korlátai vannak, ott az elektródákat a profil irányára merőlegesen kell félrepozicionálnunk ahhoz, hogy a lehető legkisebb álanomáliákat kapjuk. Méréseinket tehát fentieknek megfelelően végrehajtva nagymértékben növelhetjük adataink megbízhatóságát még olyan területeken is, ahol a felszín nagymértékben kővel borított.

A fenti vizsgálatokat elvégeztük a Wenner-α-, Wenner-β-, pól–diól és a pól–pól elrendezések esetére is. Ezek tükrében az a gyakran alkalmazott feltételezés, hogy a különböző elrendezésekkel kapott adatállományokat ugyanazzal a random zajjal terheljük, erős túlegyszerűsítésnek tűnik, hiszen a pozicionálási hibákból eredő zajok erősen elrendezésfüggőnek bizonyultak, ráadásul mivel azok szisztematikus hibát okoznak, az általuk az invertált ábrán létrehozott álanomális meglehetősen nagyméretű lehet.

7. Leképezési eljárás kifejlesztése sokcsatornás potenciáltér-képezés elektródakonfigurációban végrehajtott mérések adataiból

Kidolgoztunk egy módszert, amely alkalmas nagy mennyiségű mérési adat gyorsabb, hatékonyabb háromdimenziós értelmezésére, mint a hagyományos eljárások (Novák et al. 2005a, 2005b, Varga et al. 2008). Jóllehet ez a módszer kissé pontatlanabb, inkább kvalitatív, mint kvantitatív eredményeket szolgáltat az altalaj háromdimenziós fajlagosellenállás-eloszlásáról, ez számos esetben megfelel céljainknak. Erre mutatunk be példát a pilisszentkereszti Cisztercita Apátság területén végzett méréseinkből.

A *8.a ábrán* látható az alkalmazott elektródaelrendezés. A mérő(potenciál-)elektródák (fekete tele körök) a kutatás szempontjából érdekes területen vannak elhelyezve, attól elegendően nagy távolságra pedig az áramelektródák két, egymásra merőleges áramdipólus formájában. Az elektróda potenciálját mindkét áramdipólus esetére lemérve megkaphatjuk a fajlagos ellenállástenzort. A feldolgozás az impedanciatenzor meghatározásán alapul, a tenzorelemek mellett különböző invariánsokat is meghatároztunk.

A *8.b ábra* a kolostor körül összesen 239 darab 7 × 7,5 m^2-es területen mért invariáns ellenállás- (nevezetesen a ρ_{det}) értéket mutatja a domborzat, a kolostor felülnézeti képe, valamint néhány mesterséges anomália feltüntetésével. Valószínűleg egy felszín alatti csatorna (1), jelenlegi út (2), épületalap-maradvány (3) és kemence (4) maradványait sikerült kimutatnunk.

A (4) anomáliát – amely valószínűleg egy égetőkemence – numerikusan modelleztük, majd a számított adatokat ugyanúgy dolgoztuk fel, mintha mért adatok lettek volna. A feldolgozás eredményei a *8.c ábrán* láthatók a mért potenciál- és áramértékekből meghatározott különböző paraméterek térképeinek formájában. A felső két sorban az impedanciatenzor négy (*xx*, *xy*, *yx* és *yy*) komponense, az alsó sorban pedig az ún. egy-, két- és háromdimenziós WAL-invariánsok térképe látható. Az ábrából egyértelmű, hogy ebben az esetben az egydimenziós WAL-invariáns (bal alsó ábra) adja a mért adatok legjobb leképezését.

A terepi modellezés során kiderült, hogy az áramelektródák irányának megváltoztatása megközelítőleg 1,5–2% eltérést okozhat, amely nem befolyásolja az invariáns mennyiségek objektumra vonatkozó átlagos leképezési tulajdonságait. A referenciaelektródák helyzete nincs hatással az invariáns mennyiségek leképezési eredményeire. A mindennapi használatban a hagyományos PM-mérési módszer jól bevált megoldást jelent. A teljes tenzor mérési elvét legalábbis sokkal precízebb elektródaelhelyezés esetén érdemes választani.

A tenzorinvariánsok alkalmas paramétereknek bizonyultak a felszín alatti objektumok felülnézeti geometriájának feltárásához. Két alternatív tenzorinvariáns-csoportot határoztunk meg három-három invariáns megadásával. Az egyik csoportba a matematikai invariánsok tartoznak (determináns, az elemek négyzetösszege és a főelemek középértéke), a másik csoportba a WAL-invariánsoknak megfelelő egyenáramú sorozat (egy ellenállásbecslő paraméter, egy kétdimenziós és egy háromdimenziós indikátor). A numerikus eredmények tanúsága szerint a ρ_{ssq}, ρ_{trace}, ρ_{det} vagy ρ_{I_1} térképek mindegyike megadja a modell tényleges geometriáját. Ezt terepi eredményeink is igazolták. A többdimenziós indikátorok még további információt nyújtanak: I_{2D} a keresett objektum oldalairól (azaz a csapásirányokról), I_{3D} pedig a sarkokról. A terepi adatokra azonban ezek a többdimenziós indikátorok teljesen használhatatlannak bizonyultak (illetve csak markáns anomália létezése esetében működtek), mivel a jelszint túlságosan alacsony volta miatt a mérési hibák és a különböző zajok elnyomják a valódi fizikai hatást.

8. Aknák detektálási lehetőségeinek vizsgálata 3D egyenáramú mérésekkel

Teszteltük az elektromosellenállás-tomográfia (EET) alkalmazási lehetőségeit aknák kutatására különböző talajviszonyok és eltemetési mélységek esetén (Metwaly et al. 2008). Száraz és nedves talajban lévő, az elektróda távolság 1–2-szeresének megfelelő mélységben elhelyezett fém- és nem fém aknák kimutatási lehetőségeit teszteltük szintetikusan axiális és ekvatoriális elektróda elrendezéseket használva *(9. ábra)*. A 3D vizsgálataink tapasztalatai szerint az L1 normával és a legkisebb négyzetek módszerével végrehajtott inverzió meglehetősen jó képet adott az eltemetett aknákról *(8. ábra)*.

Mind a fém-, mind a nem fém aknák kimutathatóak voltak száraz és nedves környezetben egyaránt, de nedves környezetben csak a dipól axiális elrendezés volt képes mindkettőt kimutatni. Száraz talajban ugyanakkor a dipól ekva-

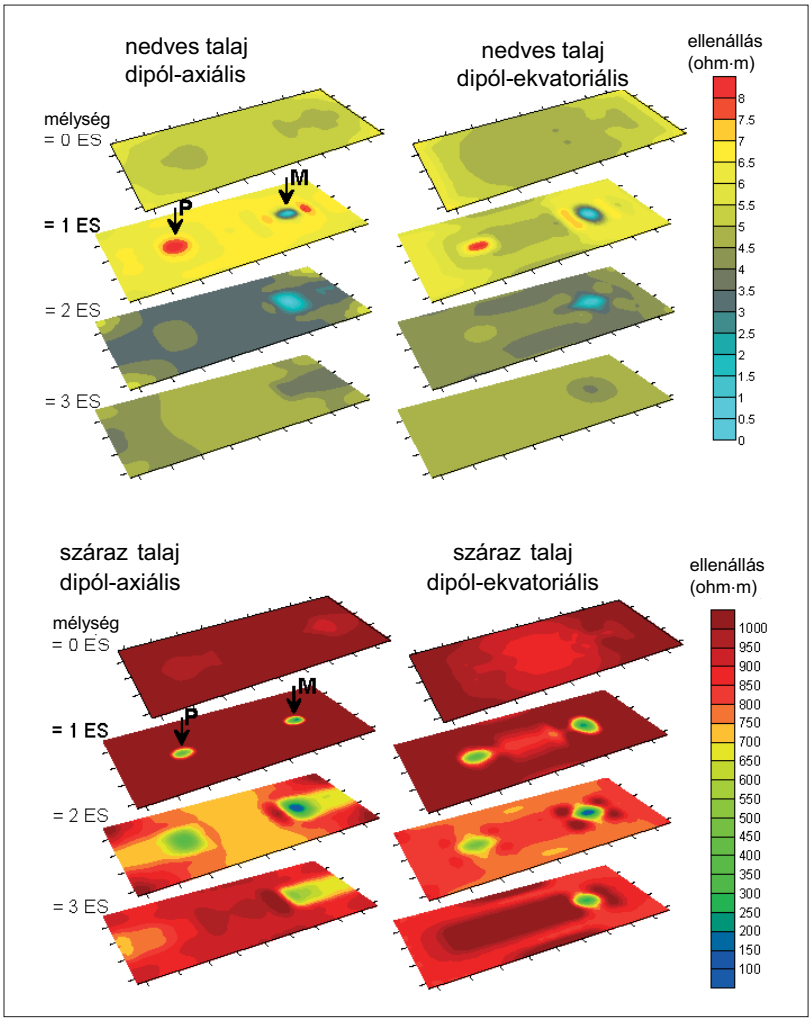
toriális elrendezés adta a legjobb leképezést. A fenti vizsgálatokat különböző zajokkal terhelt adatrendszereken is elvégeztük a korábbiakban jobbnak bizonyult dipól axiális elrendezést használva *(9. ábra)*. Ha a zajszint nem haladta meg az 5%-ot akkor mind a fém-, mind a nem fém aknák kimutathatóak voltak nedves környezetben. Ezzel szemben 10%-os zajszint esetén ezek egyike sem volt már kimutatható. Száraz talajban viszont még ilyen magas zajszint mellett is mindkét típusú akna kimutatható maradt. Kimutattuk azt is, hogy amíg az aknák eltemetési mélysége nem haladta meg az elektródatávolság kétszeresét, addig mindkét aknatípus a talaj nedvességviszonyaitól függetlenül kimutatható volt. Az eltemetési mélység növekedésével azonban a kép rohamosan romlott.

A szintetikus vizsgálatok alapján azt állíthatjuk, hogy: 1) Az EET legnagyobb előnye a fémdetektor- és a földradartechnikákkal szemben az, hogy nedves környezetben is jól működik. 2) Az EET technika hatékonyan képes együttműködni a hagyományos aknakeresési módszerekkel, legrosszabb esetben legalább, mint az azok eredményeit megerősítő eszközként. 3) A módszer vízszintes felbontóképessége az elektródák távolságának és az aknák mélységének függvénye.

9. Többirányú repedésrendszer kutatása

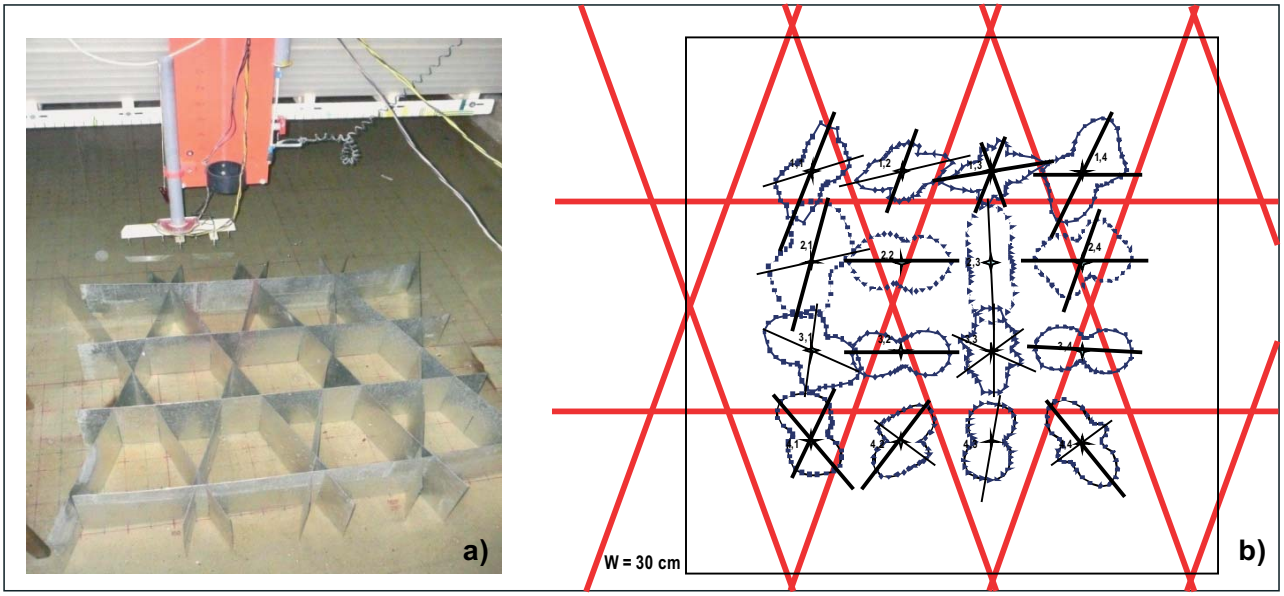
Analóg modellméréseket végeztünk abból a célból, hogy többirányú repedésrendszerek repedési irányainak kidolgozására egy standard módszert fejlesszünk ki (Szalai et al. 2009a, *10.a ábra* mutatja a használt modellt). Méréseink megerősítették Sauck és Zabik (1992) tapasztalatait, miszerint a Taylor és Fleming (1988)-féle eljárással kapott sugárdiagram alakja és így az értelmezett repedésirányok is nagymértékben függenek a mérés pozíciójától és a fedőréteg vastagságától. Az elvégzett 48 mérés közül ráadásul egyetlen esetben kaptunk tökéletes megoldást (megkapva mind a 3 létező irányt, míg egyetlen téves irány sem jelent meg, *10.b ábra*).

Az analóg modellmérések sikertelenségéből arra következtettünk, hogy a terepi mérések részleges eredménytelenségének oka nem a terepi körülményekben rejlik. Erre utal továbbá az is, hogy a modellmérések során hozzávetőleg akkora találati arányt kaptunk, mint amekkora az az irodalmi adatok szerint a terepi mérések esetén volt (59, 66 és 46% a különböző fedővastagságok esetén, míg közel 2/3 terepen). Jól kontrollálható analóg modellméréseinktől azt vártuk, hogy segítenek a Taylor és Fleming (1988)-féle eljá-



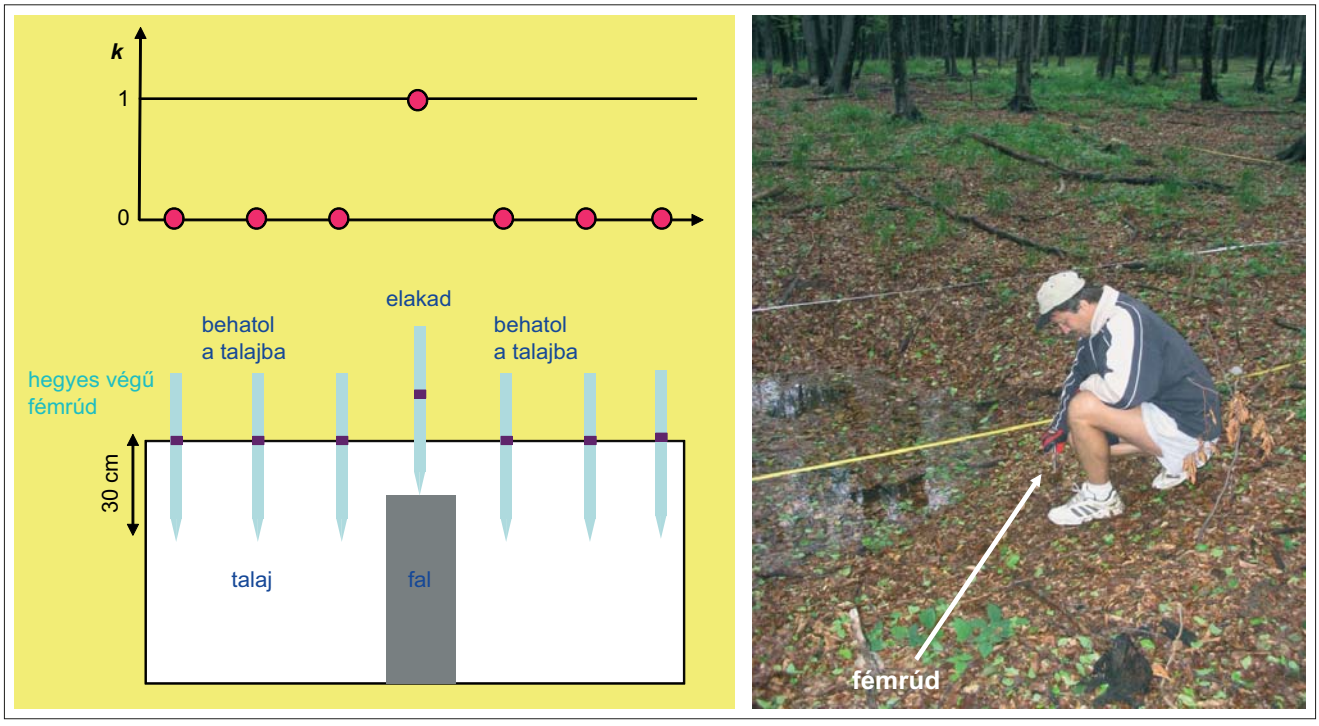
9. ábra Invertált eredmények aknák kimutatására száraz, illetve nedves környezetben axiális, illetve ekvatoriális elrendezésekkel. ES az elektródák távolsága. P és M aknák helyeit jelölik

Figure 9 Inverted models for buried landmines in wet and dry environments using axial and equatorial arrays, respectively. ES is the electrode separation. P and M are the non-metallic and metallic landmines



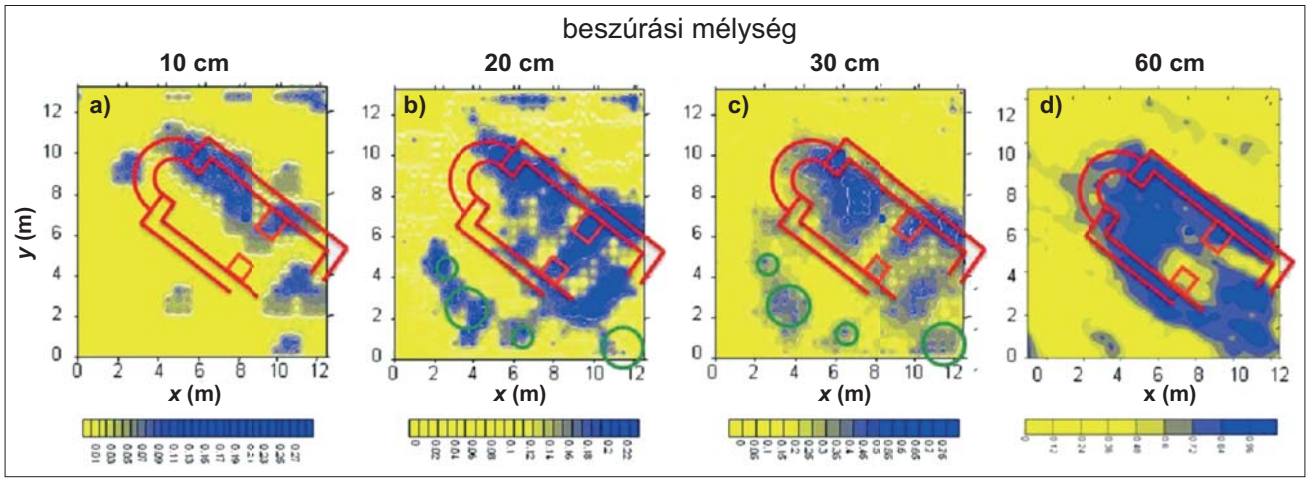
10. ábra a) A mérési elrendezés a modellel. b) Az azimutális mérések eredményei és azok értelmezése az anizotrópia paradoxon feltételezésével. A vastag vonalak a modell aluminium-lemezek (repedések) felszíni vetületeit jelölik, míg a rövid vonalak az értelmezés során kapott irányokat jelölik. Amennyiben ezek vastagok, akkor az értelmezett irány megfelel valamelyik valós iránynak

Figure 10 a) The geoelectric array and the model body; b) Results of azimuthal measurements and their interpretation assuming the existence of the anisotropy paradox. The thick triangular network of lines is the plan view of the fissure models. The short lines are the interpreted fissure directions. In case of short thick lines the interpreted and the real fissure directions are in a good agreement



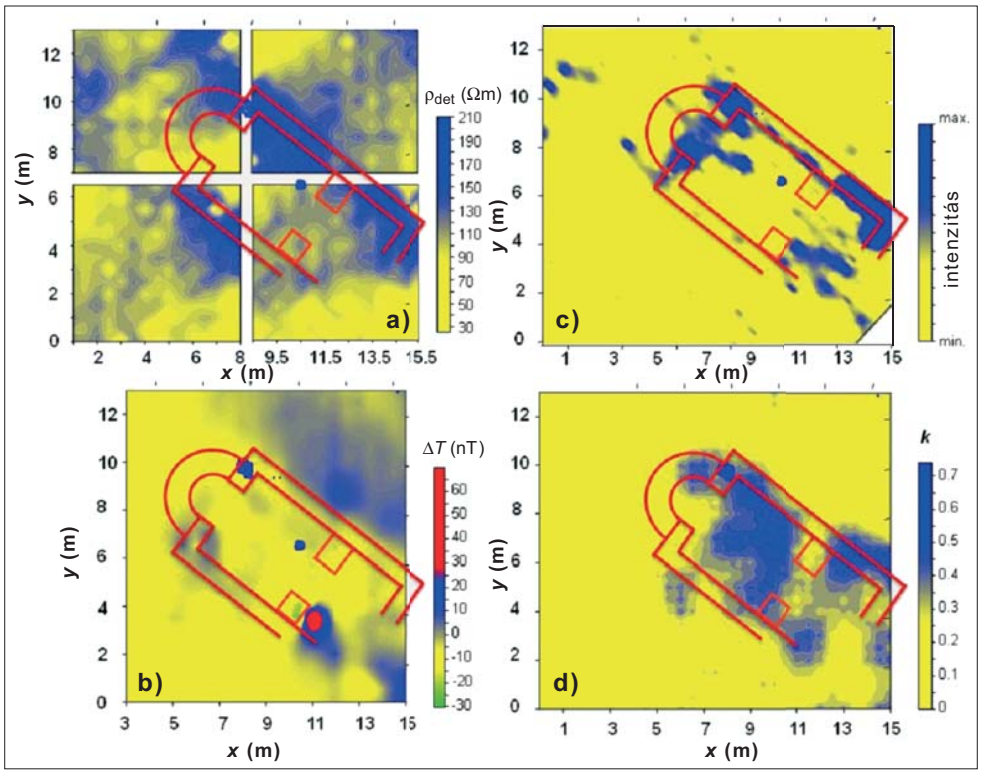
11. ábra A szúrópróbamódszer elve és egy felvétel a terepi alkalmazásáról

Figure 11 Scheme of the Pricking Probe and a photo showing its field application



12. ábra SzP módszerrel kivitelezett szondázás eredményei, sorra 10, 20, 30 és 60 cm beszúrási mélységgel mérve

Figure 12 Sounding with the PP technique with pricking (penetration) depths of 10, 20, 30 and 60 cm



13. ábra 3 geofizikai módszer és a SzP módszer eredményei: a) geoelektromos módszer, b) mágneses módszer, c) földradar, d) SzP

Figure 13 Results of three standard geophysical methods and of the pricking probe: a) geoelectric method, b) magnetic method, c) georadar, d) pricking probe

rásban rejlő problémák feltárásában és a módszer tökéletesítésében.

Vizsgálatainkból a következő következtetéseket vontuk le. Amennyiben adatainkat a Taylor és Fleming (1988) által javasolt módon az anizotrópiaparadoxon létezésének feltételezésével értelmezzük, az üledék vastagságának növekedésével a találati arány egyre romlik, míg az anizotrópiaparadoxon feltevésének elvetésével a találati arány szisztematikusan nő. (A *10.b ábra* egy adott fedőréteg-vastagság esetén mért azimutális diagramokat és az azok értelmezésével meghatározott repedésirányokat mutatja a modell felszíni vetületével együtt.) Ezek az eredmények egyértelműen mutatnak arra, hogy a mért eredményekben az anizotrópiaparadoxon esetének bekövetkezése vagy be nem következése döntő fontosságú. Ennek nyomán feltételezzük, hogy nagyon nagy, vagy nagyon kicsi elrendezéshosszú elrendezések használata esetén a megfelelő értelmezési módszert használva az eddigieknél jobb eredményekhez juthatunk.

Alternatív megoldás lehet, hogy adott területen több mérést végzünk és a kapott eredményeket statisztikusan dolgozzuk fel. Ezzel a mérés idő-, és pénzigénye nő ugyan, de megbízhatóbb adatokhoz juthatunk.

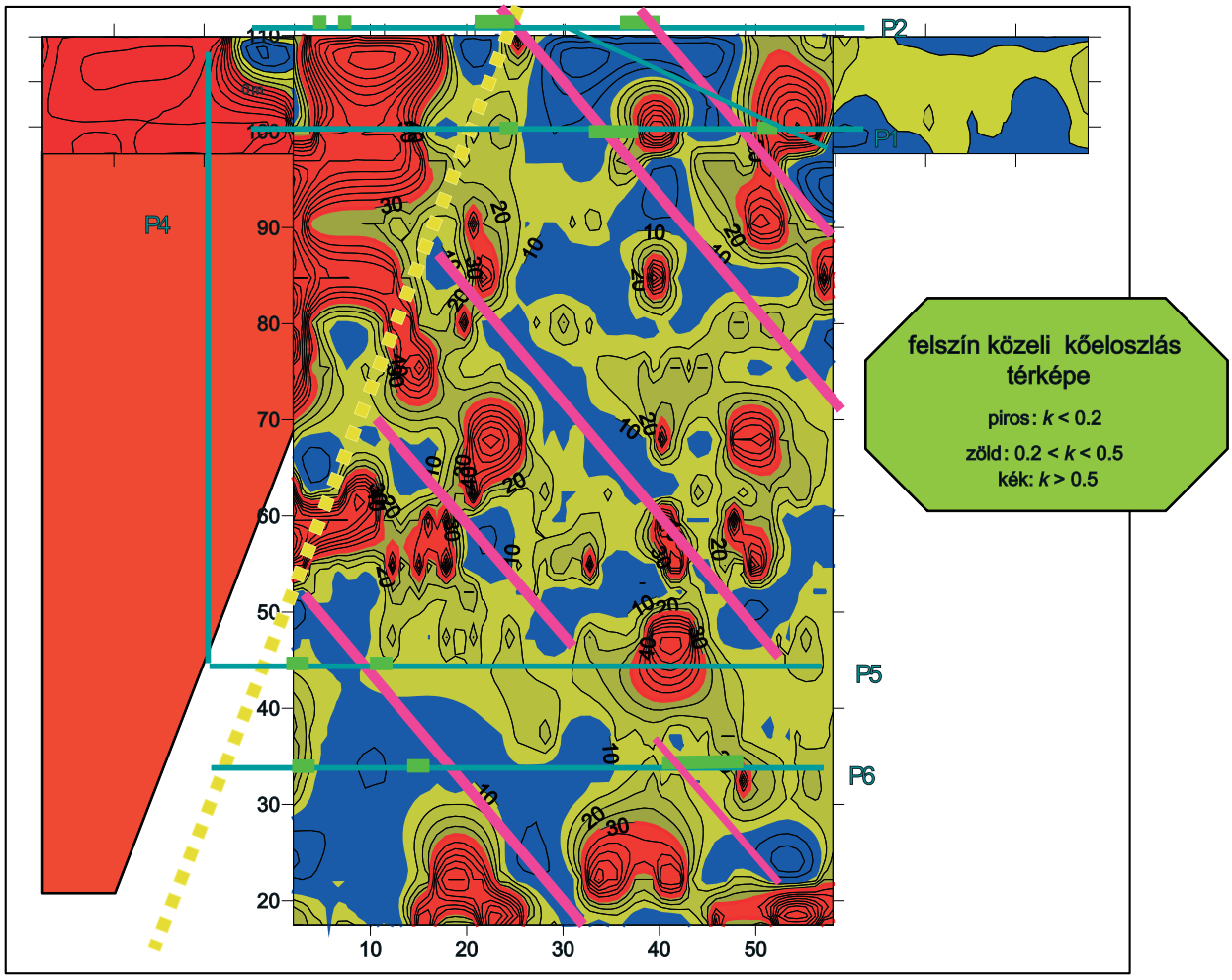
Terepi mérésekkel is vizsgáltuk a többirányú repedésrendszerek feltérképezési lehetőségeit (Szalai et al. 2005b, 2006a). Ezt szelvénymérések és forgatásos mérések kombinált használatával próbáltuk megvalósítani. Ehhez tapasztalataink szerint tekintettel kell lenni a következőkre is:

– Először ki kell választani az optimális elektródahosszt, amennyiben ugyanis az elrendezéshossz túl nagy, a repedések nem lesznek elválaszthatók egymástól, amennyiben pedig túl rövidek, a kutatási mélység nem lesz elég nagy.
– Esős időszakot követően, amikor a repedések vízzel teltek, azok hatása a domináns, száraz időszakot követően viszont az aljzat topográfiáját fogjuk méréseinkkel letapogatni.
– Nedves időszakban mind a Wenner-, mind a MAN-elrendezés jó repedésindikátornak bizonyult.

Kulcsparaméter a mérések során a repedések mélységéhez viszonyított távolsága. Ha ez elegendően nagy, még akkor is problémás lehet az egyes párhuzamos szelvényeken kapott anomáliák korrelálása.

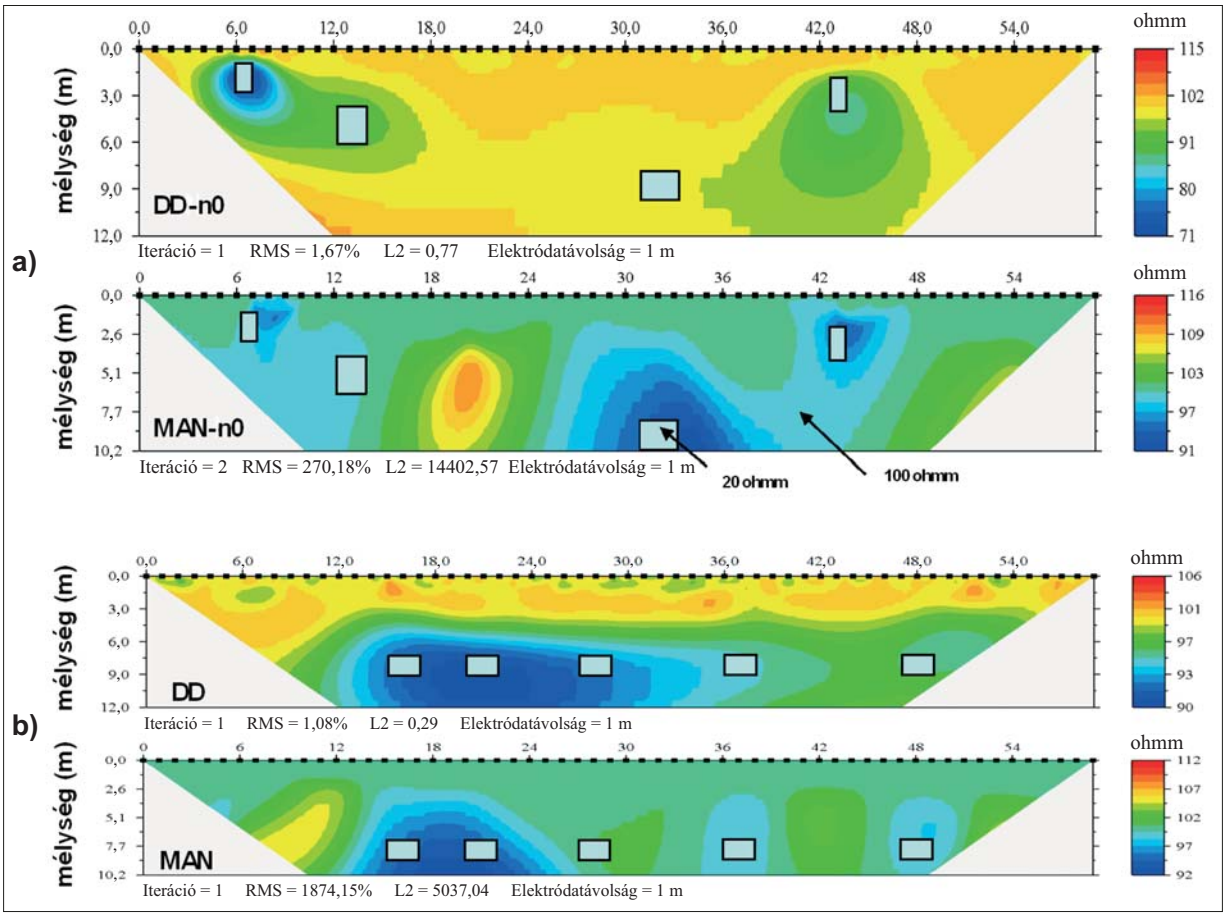
10. A szúrópróbamódszer és régészeti alkalmazása

A szúrópróba- (SzP) módszert és annak régészeti alkalmazását Szalai et al. (2009b) és Szalai et al. (2010b) tárgyalta. A módszer alapelvét a *11. ábra* illusztrálja. Segítségével először megkerestük a korábban mért feltárt, de mára elfeledett kápolna helyét a sűrű aljnövényzetben, ahol más geofizikai mérések kivitelezése meglehetősen körülményes lett volna. A kápolna részletes megismerésében is nagy segítségünkre volt a SzP módszer. Az általa adottnál a kápolna körvonalait csak a földradar adta meg jobban, ugyanakkor az sem volt képes olyan részletgazdag képet adni, mint a SzP módszer. Meghatároztuk a módszer ideális paramétereit a régészeti mérésekhez. Mintavételezési távolságnak 1 m adódott, mikor célunk valamilyen épület megkeresése volt, és 50 cm, mikor az épület részletes megismerését tűztük ki célul. A beszúrás mélységét az objektumok mélysége szabja meg. Ideális esetben különböző be-



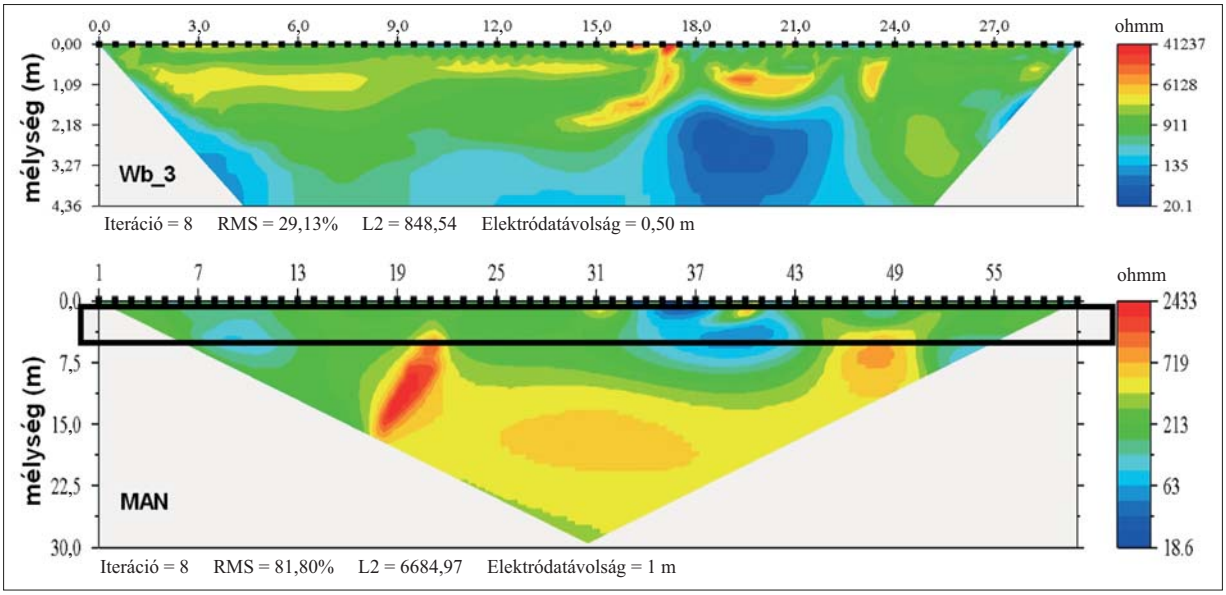
14. ábra | A SzP módszerrel kapott eredmények a Homód-árokban (Bakony)

Figure 14 | PP results from the Homód-trench (Bakony)



15. ábra | A MAN-elrendezéssel és a dipól axiális elrendezéssel kapott szintetikus eredmények összevetése a) nagy mélységben elhelyezkedő inhomogenitás detektálása során; b) felbontóképesség vizsgálatban

Figure 15 | Comparison of numerical MAN and dipole axial results a) in detection of inhomogeneity in large depth; b) in the investigation of their resolution



16. ábra | MAN- és Wenner-β-mérések eredményei a dunaszekcsői földcsuszamlás területén

Figure 16 | MAN and Wenner-β results in the area of Dunaszekcső landslide

szúrási mélységeket használva akár szondázást is végezhetünk *(12. ábra)*. A beszúrás mélysége gépesítéssel növelhető, de a régészetben úgyis elkerülhetetlen a felső meddő rétegek eltávolítása, amelyet követően pedig a 20–30 cm-es beszúrási mélységgel is már nagyon sok információ nyerhető.

A módszernek számos előnye van: terepi kivitelezése egyszerű, viszonylag gyors és olcsó; műszerigénye nincs, ezért nincs beruházási költsége és nincs is műszer, ami elromoljon; a lehető legkedvezőtlenebb terepi körülmények között is alkalmazható, úgymint: rossz időjárási körülmények, szélsőséges topográfia, sűrű aljnövényzet; szondázásra is használható; a többi geofizikai módszerhez kiegészítő információkat nyújt, sőt sok olyan részletet képes megmutatni, amelyet a többi geofizikai módszer nem, vagy nem olyan látványosan *(13. ábra)*. Alkalmazási korlátjai: ha nem szeretnénk megkockáztatni, hogy sérüljenek a régészeti maradványok; ha a régészeti maradványoktól eltérő forrásból is jelentős a felszín közeli réteg kőtörmelék-tartalma. Ezek a körülmények a méréseket magakadályozhatják, míg más zavaró körülmények (pl. gyökerek zavaró hatása) elkerülhetők, vagy a mért adatokból kiszűrhetőek.

11. Egyéb, angol nyelvű folyóiratban még nem publikált vizsgálataink

Sokelektródás egyenáramú modellmérésekkel vizsgáltuk, hogy egy homogén féltérben elhelyezett kis átmérőjű, nagy vezetőképességű 2D ható milyen maximális mélységből mutatható ki null- (MAN-), illetve egyes hagyományos elrendezésekkel.

Számítottuk, ábrázoltuk és értelmeztük a Schlumberger-, a dipól axiális, a dipól ekvatoriális, a háromelektródás és az unipole-elrendezéseknek megfelelő konfigurációjú elrendezések mágneses komponenseire a paraméterérzékenység-térképeket.

Megvizsgáltuk, hogy különböző források és tértartományok esetén mikor használtak már nullelrendezéseket, és mely esetekben nem került sor még ezek használatára. A VLF-EM elrendezés (amely szintén nullelrendezés) egy módosulatával terepi vizsgálatokat végeztünk. A kapott eredmények figyelemre méltóak. Ezzel a módszerrel egyébként elméletileg akkor várhatóak jó eredmények, ha a vizsgálni kívánt ható közel ÉNY–DK vagy ÉK–DNY csapásirányú.

A Homód-árokban (Bakony) végrehajtott terepi méréseink eredményei alapján (Szalai et al. 2006b, Szalai et al. 2008b) úgy véljük, hogy a SzP módszer alkalmas akár nagy mélységben lévő (10–50 m) mészkőfekü feltérképezésére. A jelenség elméleti alapjai még nem teljesen tisztázottak, és eredményeink is még verifikálásra szorulnak. A Homód-árokban kapott eredményeink *(14. ábra)* mindenesetre jól korrelálnak mind a helyi fő szerkezeti irányokkal, mind geoelektromos méréseink eredményeivel.

A Balfi-tönkön monitorozást végeztünk a MAN-elrendezéssel, valamint az összehasonlítás érdekében a Wenner- és a Stummer-elrendezésekkel. Méréseink során képet kaphatunk arról is, hogy a MAN-elrendezés mennyire képes a felszín alatti kőzettartományok időbeli változásainak nyomon követésére.

Fentiek mellett rengeteg további hasznos tapasztalatot gyűjtöttünk a multielektródás MAN-mérésekkel kapcsolatban, amelyek azonban nagyon szerteágazóak, és egyelőre még sok esetben ellentmondásosak. Mind a numerikus- (Szalai et al. 2005a és a *15. ábra*), mind a fizikai modellezés, mind pedig a terepi mérések során *(16. ábra)* voltak olyan modellek (esetek), amikor a MAN-elrendezés jobbnak tűnt a hagyományos elrendezéseknél.

Számos terepi mérést végeztünk a korábban említett módszerek kombinált használatával többek között vetők vizsgálatára Illmitz térségében (Ausztria, Fertő-part), földcsuszamlással kapcsolatos vizsgálatokra (Dunaszekcső), illetve karsztkutatásra (Balfi-tönk).

A K49604. számú OTKA keretében összesen 68 publikációnk, illetve kutatási jelentésünk készült. Ezek közül 10 angol nyelvű, SCI-s folyóiratban megjelent cikk, melyek összesített impaktfaktora 3,725. 10 angol nyelvű kibővített absztraktot, 6 angol nyelvű rövid absztraktot, 3 magyar nyelvű cikket és 3 kutatási jelentést készítettünk. Eredményeinket mind külföldön, mind Magyarországon 18 előadásban ismertettük.

Konklúziók

A K49604. sz. „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések" c. OTKA-projekt célja a gyakorlati mérések során nem, vagy ritkán használt elrendezések egy részének vizsgálata volt, különös tekintettel az ún. nullelrendezésekre. Ennek a célnak a megvalósításához elsőként összeszedtük az összes felszíni geolelektromos elrendezést, hogy a vizsgálni kívánt elrendezéseink helyét lássuk és hogy azokat más elrendezésekkel összevethessük. Megvizsgáltuk az egyes elrendezések kialakításának hátterében található motivációt. Elkészítettük az összes elrendezés paraméterérzékenység-térképeit és példákkal illusztráltuk ezek használhatóságát. Kiszámítottuk 30 elrendezés Roy és Apparao- és Edwards-féle kutatási mélységértékét, vertikális felbontóképességüket, a kutatási mélységértékeik és felbontóképesség-értékeik viszonyát egymáshoz, valamint a kutatási mélység és a zajok viszonyát. Megállapítottuk 6 elrendezés egyes modellekre vonatkozó ún. kimutathatósági mélységértékeit különböző zajszintek feltételezésével.

A fenti elméleti vizsgálatok segítségével terepi méréseket végeztünk. Lemértük az elektródák különböző terepi körülmények között várható pozicionálási hibáit, és kiszámítottuk az ebből eredő hibák hatását különböző sokelektródás elrendezések esetére. Tenzoriális geolektromos régészeti méréseket végeztünk, majd teszteltük a 3D elektromos tomográfia lehetőségeit aknák kimutatására különböző talajviszonyok között és különböző mélységekben. Kidolgoztunk egy eljárást többirányú repedésrendszerek kutatására. Kifejlesztettük az ún. szúrópróba-lejárást és bizonyítottuk annak használhatóságát régészeti kutatásokban.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők rendkívül hálásak a K49604. sz. OTKA-pályázat támogatásának, amely nélkül a fenti eredmények nem jöhettek volna létre. A fenti kutatómunka hosszú évei alatt további OTKA-projektektől is kaptunk résztámogatást (T049604, T037694, TS408048 és NI61013ILO). Köszönet illeti a Bolyai János Kutatási Ösztöndíjat is, amellyel Szalai Sándor kutatómunkáját támogatták. Szakmai támogatást kaptunk sok hazai kollégánktól – akik közül Ádám Antalt, Verő Józsefet (MTA GGKI, Sopron), Takács Ernőt, Gyulai Ákost, Pethő Gábort (Miskolci Egyetem) és Kis Jánost (ELGI) emeljük ki –, valamint számos külföldi kollégától.

Hivatkozások

Edwards L. S., 1977: A modified pseudosection for resistivity and IP. Geophysics 42, 1020–1036

Metwaly M., El-Qady G., Matsushima J., Szalai S., Al-Arifi N. S. N., Taha A., 2008: Contribution of 3-D electrical resistivity tomography for landmines detection. Nonlin. Processes Geophys. 15, 977–986

Novák A., Szalai S., Szarka L., 2006: Target detectability depths of DC arrays for various models. Extended Abstracts of the Near Surface 2006, Helsinki, Sept. 4–6, EAGE

Novák A., Szarka L.,Varga M., Szalai S., Pap Zs., Károlyi A., 2005a: Tensor invariant based electrical potential mapping, and its use in an archological field study. IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth, Proceedings of the 17th Workshop, http://www.emindia2004.org

Novák A., Varga M., Szalai S., Szarka L., 2005b: Tensorial apparent resistivity mapping and archological case study. Paper G 018, EAGE Meeting, Madrid, 13–18 June

Roy A., Apparao A., 1971: Depth of investigation in direct current methods. Geophysics 36, 943–959

Sauck W. A., Zabik S.M., 1992: Azimuthal resistivity techniques and the directional variations of hydraulic conductivity in glacial sediments. SAGEEP'92, 1, 197–222

Szalai S., Koppán A., Szarka L., 2007a: Effect of Positional Inaccuracies on Multielectrode Results, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul P28

Szalai S., Koppán A., Szarka L., 2008a: Effect of positional inaccuracies on multielectrode results. Acta. Geod. et Geoph. Hung. 43/1, 33–42

Szalai S., Kósa I., Nagy T., Szarka L., 2009a: Effectivity Enhancement of Azimuthal Geoelectric Measurements, Near Surface 2009 – Proceedeings of the 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, P25

Szalai S., Lemperger I., Pattantyús Á. M., Szarka L., 2009b: Pricking Probe as a Complementary Technique in Archeological Prospecting , Near Surface 2009 – Proceedeings of the 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, A03

Szalai S., Lemperger I., Pattantyús Á. M., Szarka L., 2010b: The pricking probe method in archeological prospecting. Journal of Archaeological Science 38, 175–182, DOI: 10.1016/j.jas.2010.09.002

Szalai S., Novák A., Szarka L., 2007b: Depth of Investigation of Dipole-dipole, Noncolinear and Focused Geoelectric Arrays, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul P26

Szalai S., Novák A., Szarka L., 2009c: Depth of investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays. Journal of Environmental and Enginnering Geophysics 14/1, 15–23.

Szalai S., Novák A., Szarka L., 2010a: Which geoelectric array sees the deepest in noisy environment? Depth of detectability values of multielectrode systems over various two-dimensional models, Physics and Chemistry of the Earth, közlésre elfogadva, DOI: 10.1016/j.pce.2011.01.008

Szalai S., Szarka L., 2000: An approximate analytical approach for computing geoelectric response due to a small burried cube. Geophysical Prospecting 48, 871–885

Szalai S., Szarka L., 2006: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays, Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental and Engineering Geophysics (ICEEG), Wuhan, China, June 4–9, 2006, Science Press, Inc., USA (Wang J., Xu Y., Xia J., Chen., eds.) Geophysical Solutions for Enfironment and Engineering 1, 260–264

Szalai S., Szarka L., 2007a: Classification of Surface Geoelectric Arrays, London 2007, 69th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2007

Szalai S., Szarka L., 2007b: Auxiliary Results of Collection and Classification of Surface Geoelectric Arrays, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul A09

Szalai S., Szarka L., Marquis G., Sailhac P., Kaikkonen P., Lahti I., 2005a: Colinear null arrays in geoelectrics. IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth, Procedings of the 17th Workshop, http://www.emindia2004.org

Szalai S., Szarka L., Prácser E., Bosch F., Müller I., Turberg P., 2002: Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null arrays. Geophysics 67, 1769–1778

Szalai S., Szarka L., Révi G., Varga M., 2005b: Geoelectric investigation of a multidirectional fissure system in a karstic area. P047 Near Surface 2005, Palermo

Szalai S., Szarka L., Révi G., Varga M., 2006a: Geoelectric investigation of a pluridirectional fissure system in a karstic area, Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental and Engineering Geophysics (ICEEG), Wuhan, China, June 4-9, 2006, Science Press, Inc., (Wang J., Xu Y., Xia J., Chen., eds.) Geophysical Solutions for Environment and Engineering, 1, 287–291

Szalai S., Veress M., Novák A., Szarka L., 2006b: Geofizikai vizsgálatok fedett karszton (Homód-árok, Bakony), In: Veress Márton (szerk.) Karsztfejlődés XI, Szombathely: Berzsenyi Dániel Tanárképző Főiskola, 153–170

Szalai S., Szarka L., 2008a: On the classification of surface geoelectric arrays, Geophysical Prospecting 56, 159–175

Szalai S., Szarka L., 2008b: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays I. Linear arrays. Acta. Geod. et Geoph. Hung. 43/4, 419–437, DOI: 10.1556/AGeod.43.2008.4.4

Szalai S., Szarka L., 2008c: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays II. Nonlinear and focussed arrays. Acta. Geod. et Geoph. Hung. 43/4, 439–447, DOI: 10.1556/AGeod.43.2008.4.5

Szalai S., Veress M., Novák A., Szarka L., 2008b: Application of the simplest geophysical method, the pricking probe method to map bedrock topography in a buried karstic area, EAEG-Near-surface, P17, 2008, Krakków, Poland

Taylor R. W., Fleming A. H., 1988: Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. Ground Water 26 464–474

Varga M., Novák A., Szarka L., 2008: Tensorial electrical resistivity mapping and an archeological field application. Near Surf. Geophys. 2008/1, 39–47